

КАЗАНСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

ИНСТИТУТ ФИЗИКИ

Кафедра общей физики

**Р.М. Еремина, В.В. Налетов, А.И. Скворцов, И.В. Яцык,
Д.С. Блохин, К.С. Усачев**

**ФАЗОВЫЕ ПЕРЕХОДЫ
ВТОРОЕ НАЧАЛО ТЕРМОДИНАМИКИ**

**Методические указания по выполнению
лабораторных работ
общего физического практикума
по молекулярной физике и термодинамике**

Казань – 2014

УДК 530.10
ББК 22.36
Э 41

*Принято на заседании кафедры общей физики
Протокол № 7 от 24 февраля 2014 года*

Рецензент:

доктор физико-математических наук,
профессор кафедры промышленной электроники КГЭУ В.А. Уланов

**Еремина Р.М., Налетов В.В., Скворцов А.И., Яцык И.В.,
Блохин Д.С., Усачев К.С.**

Фазовые переходы. Второе начало термодинамики/
сост. Р.М. Ерёмина, В.В. Налетов, А.И. Скворцов и др.-Казань:
Казан. ун-т, 2014.-57с.

Методическое пособие «Фазовые переходы. Второе начало термодинамики» предназначены для студентов естественно - научных специальностей университетов. Приводятся описания лабораторных работ физического практикума общего курса физики, раздел «Молекулярная физика и термодинамика», по теме «Основания молекулярно-кинетической теории. Законы идеального газа». В каждой работе даны подробные описания установок, ход выполнения работ и список вопросов для самостоятельной подготовки.

© Еремина Р.М. и др, 2014
© Казанский университет, 2014

Содержание

2311. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ.....	4
2312. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА	7
232. НАБЛЮДЕНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ГАЗ В КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ	10
235. ПОНИЖЕНИЕ ТОЧКИ ЗАМЕРЗАНИЯ ВОДЫ	16
236. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ПАРА ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ	21
2411. ПРЕВРАЩЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОТУ	28
2412. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ	31
2421. ФРИКЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ДВИГАТЕЛЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ.....	34
2422. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК НАГРЕВАТЕЛЬ.....	38
2423. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК ХОЛОДИЛЬНИК	44
2424. PV ДИАГРАММА ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ	50
243 ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ТЕПЛОВОГО НАСОСА	54

2311. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СКРЫТОЙ ТЕПЛОТЫ ИСПАРЕНИЯ ВОДЫ

Введение

При передаче теплоты веществу при постоянном давлении, температура вещества, как правило, возрастает. Если, в процессе передачи происходит фазовый переход, температура не повышается, так как передаваемое количество теплоты тратится на фазовое превращение. К таким переходам относятся *фазовые переходы первого рода*. Как только фазовый переход закончен, температура снова возрастает, если нагревание продолжается. Примером фазового перехода первого рода является испарение. Энергия, потребляемая на испарение единицы массы вещества, называется *удельной теплотой испарения* Q_V .

В лабораторной работе, величина удельной теплоты испарения воды определяется по конденсации чистого пара в калориметре. Пар нагревает холодную воду до температуры смеси ϑ_M и конденсируется в воду, в свою очередь, охлаждаясь до температуры смеси. Теплота испарения передается воде. В дополнение к температуре смеси, начальная температура ϑ_2 и масса m_2 холодной воды, а также масса m_1 конденсированной воды измеряются. Используя эти данные можно найти теплоту, израсходованную на испарение, а, следовательно, и удельную теплоту испарения.

Теплота, выделяемая паром является суммой теплоты:

$\Delta Q_1 = c \cdot m_1 (100^\circ \text{C} - \vartheta_M)$	(1)
---	-----

(c – удельная теплоемкость воды), которую сконденсированная вода выделяет, охлаждаясь с $\vartheta_1 \approx 100^\circ \text{C}$ до температуры смеси ϑ_M , и теплоты ΔQ_2 , которая выделяется в процессе конденсации пара в воду. Последняя, равна количеству теплоты, которое необходимо передать воде при температуре $\vartheta_1 \approx 100^\circ \text{C}$ для того чтобы её вновь испарить, следовательно:

$\Delta Q_2 = m_1 \cdot Q_V$	(2)
------------------------------	-----

Теплота, которая поглощается холодной водой при смешивании с паром, определяется:

$\Delta Q_3 = c \cdot m_2 (\vartheta_M - \vartheta_2)$	(3)
--	-----

В тоже время, теплоту, которую поглощает калориметр, можно рассчитать, поскольку водяной эквивалент массы калориметра m_K известен:

$\Delta Q_4 = c \cdot m_K (\vartheta_M - \vartheta_2),$	(4)
---	-----

где $m_K=24$ гр. Так как выделяемое количество теплоты $\Delta Q_1 + \Delta Q_2$ и поглощаемое количество теплоты $\Delta Q_3 + \Delta Q_4$ равны между собой, получаем:

$\frac{Q_V}{c} = \frac{m_2 + m_K}{m_1} (\vartheta_M - \vartheta_2) - (100^\circ \text{C} - \vartheta_M)$	(5)
--	-----

Цель работы

Измерить удельную теплоту испарения воды

Решаемые задачи

- ✓ измерение температуры с помощью термопары
- ✓ использования калориметра для измерения теплоты
- ✓ наблюдение фазового перехода первого рода

Приборы и принадлежности

- ✓ калориметр (сосуд Дьюара)
- ✓ водоотделитель
- ✓ температурный датчик (термопара NiCr-Ni)
- ✓ цифровой термометр или Mobile-CASSY с адаптером
- ✓ лабораторные весы 610 г
- ✓ парогенератор
- ✓ силиконовая трубка
- ✓ лабораторный штатив с V-образным основанием
- ✓ два штативных зажима
- ✓ два универсальных зажима
- ✓ лабораторный стакан, 400 мл

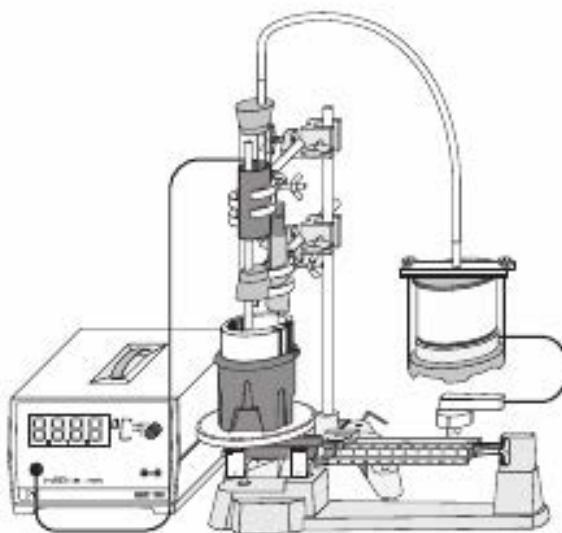


Рис. 1 Схема экспериментальной установки для определения удельной теплоемкости воды

Порядок выполнения работы

Требования безопасности при использовании сосуда Дьюара

Опасность взрыва: сосуд Дьюара является тонкостенным, вакуумированным стеклянным сосудом, который может быть разбит в результате механического воздействия.

- ✓ Не ударяйте и не роняйте сосуд Дьюара
- ✓ Не позволяйте каким либо твердым предметам падать на поверхность или во внутрь сосуда
- ✓ Не царапайте стеклянную поверхность острым предметом

Подготовка установки к работе

1. Опустите датчик температуры в сосуд Дьюара.
2. Откройте крышку парогенератора. Заполните дистиллированной водой парогенератор на высоту около 2 см. Накройте крышкой и тщательно закрепите зажимным устройством.
3. Проверьте расположение входной трубки сепаратора воды. Кончик трубки должен быть расположен так, чтобы расстояние до нижней пробки было больше, чем расстояние до верхней пробки. Сдвиньте выходную трубку пара так, чтобы она почти касалась верхней пробки.
4. Используйте силиконовые трубки для подключения выходной трубки парогенератора к входной трубке водоотделителя. Не перекрывайте водоотделитель.

Выполнение измерений

5. Не задевая водоотделитель, приподнимите сосуд Дьюара и выставите нулевой отсчет на весах.
6. Поставьте сосуд Дьюара на весы и определите массу пустого сосуда.
7. Налейте приблизительно 150 г дистиллированной воды в сосуд Дьюара. Определите массу воды m_2 и её температуру ϑ_2 . Для определения температуры нажмите кнопку «меню» на панели сенсора.
8. Пробно закрепите водоотделитель так, чтобы выходная трубка была на 1 см выше середины сосуда Дьюара.
9. Поставьте водоотделитель в стакан и убедитесь, что силиконовые трубки хорошо зафиксированы.
10. Включите парогенератор в сеть. В нижней части парогенератора поставьте выключатель на цифру 4.
11. Дождитесь появления пара на выходе водоотделителя.
12. Закрепите водоотделитель над сосудом Дьюара ещё раз. Пронаблюдайте увеличение общей массы и повышения температуры.
13. После того как общая масса увеличится на 20 г, выключите парогенератор и быстро определите температуру смеси.
14. Не трогайте прибор до полного остывания воды.

Обработка и представление результатов

15. Используя формулы (1-5), определите удельную теплоту парообразования воды, сравните с табличным значением.

2312. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОЙ ТЕПЛОТЫ ПЛАВЛЕНИЯ ЛЬДА

Введение

При передаче теплоты веществу при постоянном давлении, температура вещества, как правило, возрастает. Если, в процессе передачи происходит фазовый переход, температура не повышается, так как передаваемое количество теплоты тратится на фазовое превращение. К таким переходам относятся *фазовые переходы первого рода*. Как только фазовый переход закончен, температура снова возрастает, если нагревание продолжается. Известным примером фазового перехода первого рода является превращение воды в лед. Энергия, потребляемая на плавление единицы массы вещества, называется *удельной теплотой плавления* Q_S .

В лабораторной работе, величина удельной теплоты плавления льда определяется по изменению температуры при смешивании льда и воды в калориметре. Лёд охлаждает воду до температуры теплового равновесия ϑ_m и тает при температуре ϑ_m . Происходит скрытое поглощение теплоты при таянии льда. Проводя измерения температуры смеси ϑ_m , начальной температуры ϑ_2 , массы m_2 теплой воды, а также массу m_1 льда, можно определить удельную теплоту плавления льда. Так как лёд, массой m_1 полностью тает, то теплота, которая необходима для нагревания талой воды от температуры $\vartheta_1 \approx 0^\circ \text{C}$ до температуры смеси ϑ_m определяется выражением:

$\Delta Q_1 = c \cdot m_1 (\vartheta_m - 0^\circ \text{C})$	(1)
---	-----

Теплота, которая выделяется при таянии льда равна:

$\Delta Q_2 = m_1 \cdot Q_S$	(2)
------------------------------	-----

Теплота, которая выделяется при охлаждении налитой предварительно в калориметр воды массой m_2 определяется:

$\Delta Q_3 = c \cdot m_2 (\vartheta_2 - \vartheta_m)$	(3)
--	-----

Часть энергии выделяется при охлаждении калориметра. Если предположить, что удельная теплоемкость калориметра равна удельной теплоемкости воды, то затраченная теплота рассчитывается по формуле:

$\Delta Q_4 = c \cdot m_K (\vartheta_2 - \vartheta_m)$	(4)
--	-----

где $m_K=24$ гр. Так как выделяемое количество теплоты $\Delta Q_1 + \Delta Q_2$ и поглощаемое количество теплоты $\Delta Q_3 + \Delta Q_4$ равны между собой, получаем:

$\frac{Q_S}{c} = \frac{(m_2 + m_K)}{m_1} \cdot (\vartheta_2 - \vartheta_m) - (\vartheta_m - 0^\circ \text{C})$	(5)
--	-----

Цель работы

Измерить удельную теплоту плавления льда

Решаемые задачи

- ✓ измерение температуры с помощью термопары
- ✓ использования калориметра для измерения теплоты
- ✓ наблюдение фазового перехода первого рода

Приборы и принадлежности

- ✓ калориметр (сосуд Дьюара)
- ✓ водоотделитель
- ✓ температурный датчик (термопара NiCr-Ni)
- ✓ цифровой термометр или Mobile-CASSY с адаптером
- ✓ лабораторные весы 610 г
- ✓ парогенератор
- ✓ силиконовая трубка
- ✓ лабораторный штатив с V-образным основанием
- ✓ два штативных зажима
- ✓ два универсальных зажима
- ✓ лабораторный стакан, 400 мл

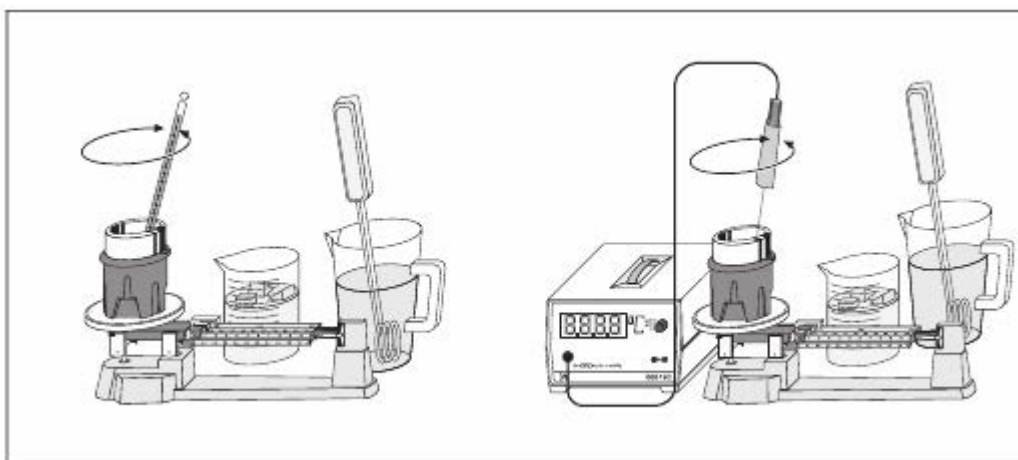


Рис. 1 Схема экспериментальной установки для определения удельной теплоты плавления льда. Слева: измерение температуры с помощью термометра. Справа: измерение температуры с помощью датчика температуры.

Порядок выполнения работы

Требования безопасности при использовании сосуда Дьюара

Опасность взрыва: сосуд Дьюара является тонкостенным, вакуумированным стеклянным сосудом, который может быть разбит в результате механического воздействия.

- ✓ Не ударяйте и не роняйте сосуд Дьюара
- ✓ Не позволяйте каким-либо твердым предметам падать на поверхность или во внутрь сосуда
- ✓ Не царапайте стеклянную поверхность острым предметом

Выполнение измерений

1. Не задевая водоотделитель, приподнимите сосуд Дьюара и выставите нулевой отсчет на весах.
2. Поставьте сосуд Дьюара на весы и определите массу пустого сосуда m_k .
3. Налейте приблизительно 150 г дистиллированной воды в пластиковый стакан и нагрейте кипятильником воду массой m_2 до температуры между 40°C и 50°C .
4. Налейте теплую воду из пластикового стакана в сосуд Дьюара. Определите массу воды m_2 и её температуру ϑ_2 . Для определения температуры нажмите кнопку «меню» на панели сенсора.
5. Взвести лёд массой m_1 и положите его в теплую воду
6. Перемешивайте до тех пор, пока лёд не растает, и определите температуру ϑ_m

Обработка и представление результатов

7. Используя формулы (1-5), определите удельную теплоту плавления льда.
8. Эксперимент проведите три раза и определите среднюю удельную теплоту плавления льда, сравните с табличным значением.

232. НАБЛЮДЕНИЕ ФАЗОВОГО ПЕРЕХОДА ЖИДКОСТЬ-ГАЗ В КРИТИЧЕСКОЙ ТОЧКЕ

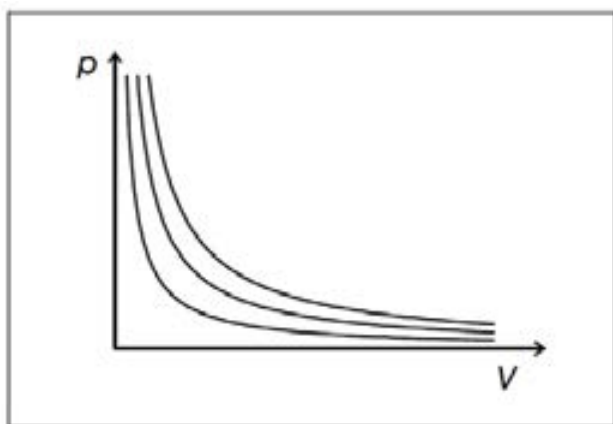


Рис. 1 PV диаграмма с изотермами идеального газа

увеличивается обратно пропорционально объему (см. рис. 1). Отношение между давлением p , температурой T и молярным объемом V идеального газа описывается уравнением состояния идеального газа:

$$pV = RT, \quad (1)$$

где $R = 8.314 \frac{\text{Дж}}{\text{моль} \cdot \text{К}}$ — газовая постоянная.

Большинство реальных газов приближаются к свойствам идеального газа тогда, когда их

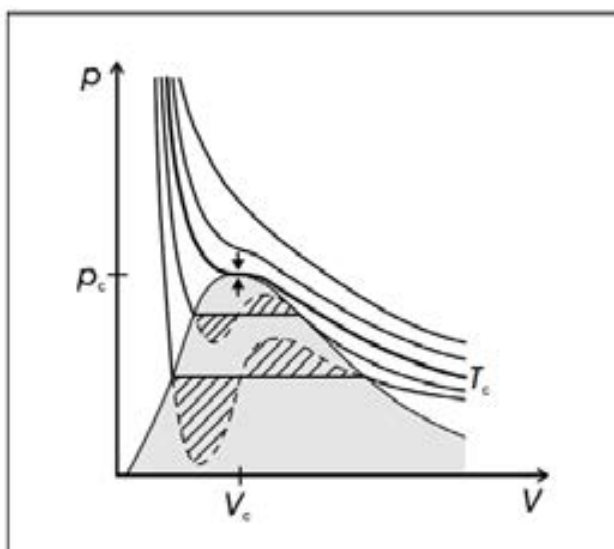


Рис. 2 PV диаграмма с изотермами реального газа. Смеси пар-жидкость существуют в затемненной области диаграммы. Стрелками обозначено положение критической точки.

Введение

Одной из важных характеристик идеального газа является то, что он не конденсируется, даже если температура достигает абсолютного нуля. Такого газа в природе не существует. В противном случае он должен был бы состоять из частиц, которые малы по сравнению со средними расстояниями между ними даже при низких температурах. А так же,

которые, за исключением упругих столкновений, не взаимодействуют друг с другом. Когда идеальный газ сжимают при постоянной температуре, давление

увеличивается обратно пропорционально объему (см. рис. 1). Отношение между давлением p , температурой T и молярным объемом V идеального газа описывается уравнением состояния идеального газа:

$$pV = RT, \quad (1)$$

состояние довольно далеко от точки конденсации или сжижения, т. е. при комнатной температуре и атмосферном давлении. Как только газ приближается к точке конденсации, т. е. при повышении давления p или при понижении температуры T , его свойства значительно отклоняются от свойств идеального газа. Плотность газа увеличивается, и частицы в среднем располагаются экстремально близко друг к другу. Поведение реального газа приблизительно описывается уравнением Ван дер Ваальса:

$$\left(p + \frac{a}{V^2} \right) (V - b) = RT \quad (2)$$

В этом уравнении, зависящие от вещества, константы a и b имеют смысл поправок на взаимное притяжение частиц газа и их эффективный объем.

На Рис. 2 показаны изотермы реального газа в виде PV диаграммы. Изотерма, к которой может быть проведена горизонтальная касательная в переломной точке, имеет особое значение. Точку перегиба определяют как критическую точку, а величины, связанные с ней, называют: критическим давлением p_c , критическим молярным объемом V_c и критической температурой T_c .

При температурах выше критической вещество находится в газообразном состоянии при любых давлениях и изотермы соответствуют уравнению Ван-дер-Ваальса, которое в этом случае приближается к уравнению состояния идеального газа. Вещество называют газом.

При температурах ниже критической, ситуация намного сложнее. Если объем достаточно большой (рис.2 справа от затененной области), вещество находится в газообразном состоянии, и называется паром. В малых объемах (слева от затененной области), вещество является жидкостью и она практически несжимаема. Затененная область относится к смеси жидкость-пар в котором объем пара пропорционально увеличивается с лево на право. В этой области уравнение Ван-дер Ваальса отклоняется от действительности: при постоянной температуре, изменение объема приводит к изменению пропорции пара в смеси, но давление в смеси не изменяется. Пунктирные кривые, которые соответствуют уравнению Ван-дер Ваальса, должны быть заменены на горизонтальные отрезки. Отрезки соответствуют давлению пара, при котором пар и жидкость находятся в равновесии друг с другом. Жидкость и пар разделяются под действием силы тяжести, так как имеют различные плотности. Плотность пара увеличивается с температурой, в то время как плотность жидкости уменьшается. При критической температуре их плотности одинаковы. Жидкость и пар неразличимы, они полностью перемешаны.

Когда смесь находится в критическом состоянии (точке), рассеяние света в барокамере достигает очень высокого уровня. Этот феномен назван критической опалесценцией и происходит из-за флуктуаций плотности. Флуктуации значительно увеличиваются при приближении к критической точке, потому что сжимаемость сильно возрастает и сопротивление изменению плотности становится слабым. Коротковолновый свет рассеивается значительно сильнее чем длинноволновый.

Это явление можно наблюдать в барокамере при критической температуре. Оболочка камеры нагревается потоком горячей воды или паром. Два устойчивых к высокому давлению прозрачных окна позволяют нам наблюдать поведение субстанции внутри барокамеры, когда она достигает критической температуры T_c при нагревании, и наоборот, когда остывает. Явление может наблюдаться непосредственно в барокамере, либо проецировать на экран.

Барокамера заполнена фторидом серы SF_6 . При комнатной температуре, величина критической плотности SF_6 (обратное от критического объема) приблизительно равна усредненному значению плотности жидкости и газа. При комнатной температуре барокамера наполовину наполнена сжиженным газом и таким образом при нагревании система способна пройти через критическую точку.

SF_6 имеет следующие значения термодинамических величин в критической точке: критическая температура: $T_c=318.7$ К, критическое давление: $p_c=37.6$ Атм и критический молярный объем: $V_c=200$ см³/моль

Цель работы

1. Наблюдение размытия границы раздела фаз между жидкостью и газом при нагревании выше критической температуры.
2. Наблюдение образования границы раздела фаз при охлаждении ниже критической температуры.

3. Наблюдение критической опалесценции.

Решаемые задачи

- ✓ измерение температуры с помощью термопары
- ✓ использование оптических приборов для создания изображения физического процесса в проходящем свете
- ✓ наблюдение фазового перехода первого рода в барокамере

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ барокамера
- ✓ лампа с фокусирующим объективом
- ✓ трансформатор
- ✓ оптическая скамья
- ✓ линза в держателе
- ✓ прямоугольная призма
- ✓ четыре трубки
- ✓ лабораторный штатив
- ✓ термостат замкнутого цикла
- ✓ резиновые трубки
- ✓ цифровой термометр
- ✓ температурный датчик (термопара NiCr-Ni)

Порядок выполнения работы

Требования безопасности при работе с барокамерой

- ✓ Для нагрева барокамеры использовать только пар или циркулирующую воду.
- ✓ Во избежание обжога не касаться барокамеры во время эксперимента.
- ✓ Необходимо осторожно проверить выход горячей воды или пара.
- ✓ Перед началом эксперимента проверить надёжность закрепления трубок.
- ✓ Не ослаблять винт-заглушку при повышенном давлении в барокамере.
- ✓ Не нагревать барокамеру выше 90°.

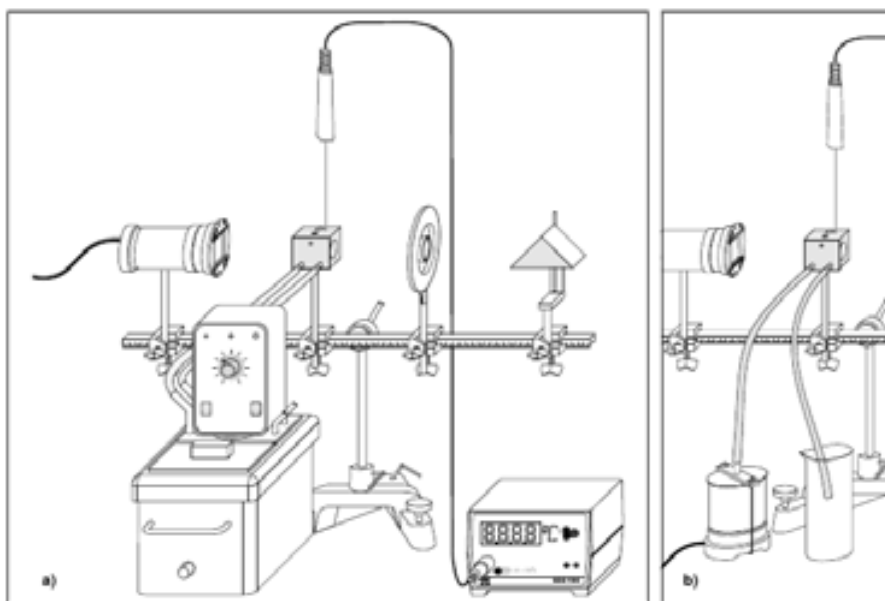


Рис. 3 Экспериментальная установка для наблюдения критической точки

Подготовка установки к работе

1. Проверьте по рис.1а комплектность и правильность сборки экспериментальной установки.
2. Для улучшения теплового контакта добавьте немного воды в отверстие с температурным датчиком.
3. Включите лампу и спроецируйте изображение вещества, заполняющего барокамеру, на экран (например, лист белой бумаги).
4. Сфокусируйте изображение мениска жидкости, передвигая линзу вдоль оптической скамьи.

Выполнение измерений

5. Включите термостат и установите начальную температуру 40°C .
6. После достижения температуры 40°C , повышайте температуру циркулирующей воды медленно, чтобы нагрев содержимого барокамеры происходил равномерно. Это позволит отчетливо наблюдать размытие границы раздела фаз.
7. После того, как температура превысит критическое значение, установите температуру на термостате ниже критической температуры.
8. Чтобы уменьшить отрицательное воздействие температурных градиентов по объему камеры, целесообразно после того, как температура в системе спадёт ниже критической, вновь постепенно увеличить температуру и повторить эксперимент.
9. Как результат вашего наблюдения запишите значение критической температуры.

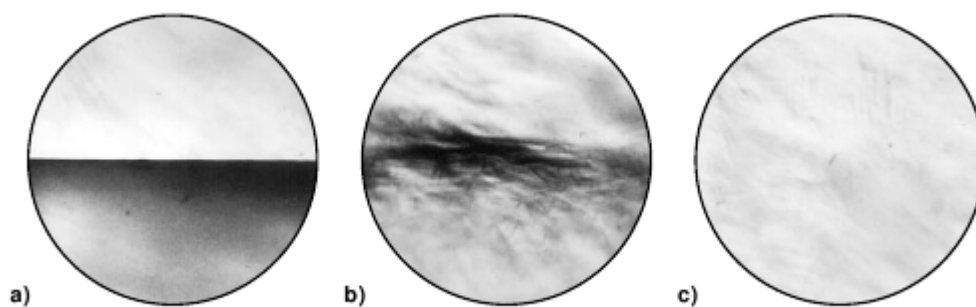


Рисунок 2 Наполнение барокамеры:

- a) ниже критической температуры**
- b) при критической температуре (разложение фазовой границы)*
- c) выше критической температуры*

Пример наблюдения

Сразу после начала нагрева, в жидкой фазе появляются прослойки (неоднородности в форме полос). Далее жидкость начинает кипеть, а с верхней части камеры, капать конденсат. Окончательно, появляются прослойки в газовой фазе, особенно на границе. Незадолго до достижения критической точки, кипение становится таким интенсивным, что жидкость, неоднородная вследствие пузырьков газа, рассеивает свет по всем направлениям (диффузно). Это затемняет проецируемое изображение жидкости. Неоднородности становятся более интенсивными, изначально в газовой фазе непосредственно выше границы раздела, затем внутри газовой фазы и, окончательно, в оставшейся жидкой фазе.

Когда система медленно проходит через критическую температуру, фазовая граница между жидкостью и газом начинает флуктуировать, расширяться и, в итоге, исчезает. В последний момент, перед исчезновением границы, жидкая фаза принимает коричневый оттенок. Исчезновение границы между газовой и жидкой фазой можно наблюдать на проецируемом изображении. Изображение становится ярким, как только содержание барокамеры трансформируется в однородную фазу. Тем не менее, в барокамере наблюдается интенсивная турбулентность с прослойками, которая рассеивается при дальнейшем повышении температуры. Эти процессы обусловлены имеющимися в камере градиентами температуры.

После выключения нагрева, прослойки, почти полностью исчезнувшие, становятся опять отчетливыми при приближении к критической температуре. В нижней части камеры наблюдается небольшое затемнение обусловленное образованием аэрозоли. Содержимое барокамеры, целиком, становится все более и более красно-коричневым (критическая опалесценция). Прослойки продолжают увеличиваться. Внезапно, внутри барокамеры темнеет, газ конденсируется и наблюдается рост уровня

жидкости. Газовая фаза содержит аэрозоль, которая постепенно конденсируется. Окончательно, газовая фаза становится прозрачной, в то время как жидкая фаза продолжает кипеть.

При возобновлении нагрева, жидкость кипит все более и более интенсивно. Далее, газовая фаза становится желтоватой, а жидкая приобретает красно-коричневый цвет (критическая опалесценция). Граница раздела расширяется, затем полностью исчезает. Сразу выше критической температуры, содержимое барокамеры становится однородно желто-коричневым, вместе с интенсивными прослойками и бурной турбулентностью. В итоге, температура выходит из диапазона существования критической опалесценции и в барокамере наблюдаются только вихревые прослойки.

235. ПОНИЖЕНИЕ ТОЧКИ ЗАМЕРЗАНИЯ ВОДЫ

Введение

Условием кристаллизации является равенство давления насыщенного пара растворителя над раствором давлению пара над твёрдым растворителем. Поскольку давление пара растворителя над раствором всегда ниже, чем над чистым растворителем, это равенство всегда будет достигаться при температуре более низкой, чем температура замерзания растворителя. Так, океанская вода начинает замерзать при температуре около минус 2 °С. Разность между температурой кристаллизации растворителя T_{fr}° и температурой начала кристаллизации раствора T_{fr} приводит к понижению температуры кристаллизации. Изменение температуры кристаллизации бесконечно разбавленных растворов не зависит от природы растворённого вещества и прямо пропорционально моляльной концентрации раствора m .

$T_{fr}^{\circ} - T_{fr} = Km$	(1)
--------------------------------	-----

Моляльная концентрация — количество растворённого вещества (число молей) в 1000 г растворителя. Измеряется в [моль/кг]. Поскольку по мере кристаллизации растворителя из раствора концентрация последнего возрастает, растворы не имеют определённой температуры замерзания и кристаллизуются в некотором интервале температур. Коэффициент пропорциональности K в выражении (1) — это криоскопическая постоянная растворителя, имеющая физический смысл понижения температуры кристаллизации раствора с концентрацией 1 моль/кг. Для воды она равна 1.86 К·моль⁻¹·кг.

В свойствах смесей есть интересная закономерность: температура плавления смеси нескольких веществ ниже, чем температура плавления каждого из чистых веществ по отдельности. Например, температура плавления чистой воды (в виде льда или снега) 0°С. Если смешать лёд с поваренной солью, то смесь начинает плавиться при более низких минусовых температурах. Температура плавления зависит от соотношения льда и соли, скорости перемешивания и даже степени измельчения льда. Самая низкая температура замерзания данного раствора соли называется *криогидратной* температурой (точкой). Для раствора NaCl криогидратная температура минус 21,2°С при концентрации 23,1%.

Криоскопическим методом можно определить молекулярную массу вещества. Молекулярная масса — масса молекулы, выраженная в атомных единицах массы, численно равна молярной массе, но, однако, они различаются по размерности.

Для растворов, проводящих электрический ток (электролитов) в отклонение температуры замерзания раствора Вант-Гофф внес поправку, учитывающий диссоциацию молекул растворённого вещества — изотонический коэффициент i :

$T_{fr}^{\circ} - T_{fr} = iKm.$	(2)
----------------------------------	-----

Цель работы

Измерить криоскопическую константу воды; молекулярную массу вещества; изотонический коэффициент Вант-Гоффа

Решаемые задачи

- ✓ измерение температуры с помощью термопары
- ✓ использования прибора для криометрических измерений для измерения температуры замерзания растворов
- ✓ наблюдение фазового перехода первого рода

Приборы и принадлежности

- ✓ Мерный цилиндр 100мл
- ✓ Фарфоровая ступка, 113 мм Ш
- ✓ Ванночки для весов
- ✓ Воронка
- ✓ Адаптер, конус резьба
- ✓ Цифровой термометр
- ✓ Шпатель, 150 x 5 мм
- ✓ Шпатель с наконечником в виде ложки, 150 x 22 мм
- ✓ Фарфоровый пестик, длина 100 мм
- ✓ Датчик температуры NTC , длинный
- ✓ Аппарат для определения молярной массы - температура застывания
- ✓ Гидрохинон, 250 г
- ✓ Хлорид натрия, 500г
- ✓ Цифровой секундомер
- ✓ Прецизионные электронные весы TE-153

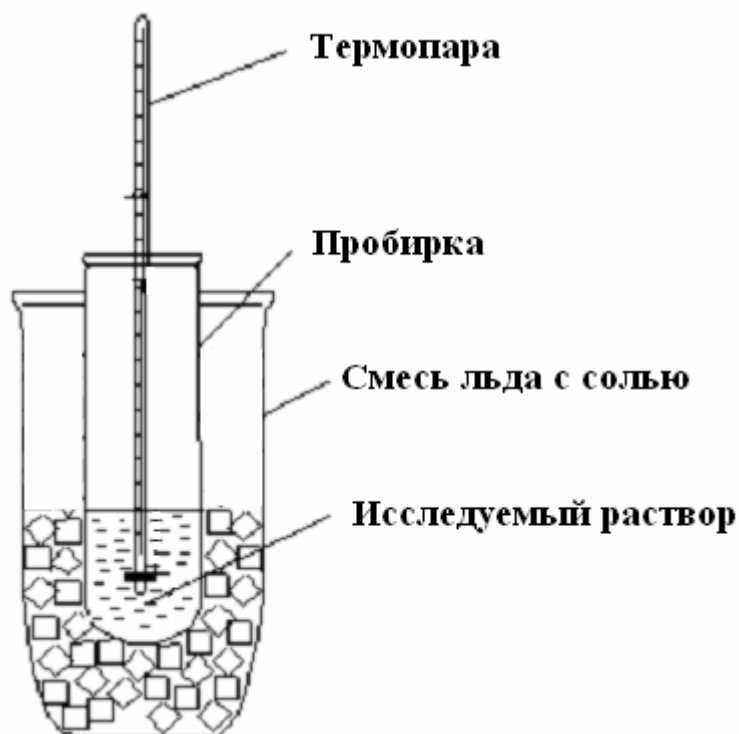


Рис.1. Прибор для криометрических измерений.

Требования безопасности при использовании сосуда Дьюара

Опасность взрыва: прибор для криометрических измерений является тонкостенным, вакуумированным стеклянным сосудом, который может быть разбит в результате механического воздействия.

- ✓ Не ударяйте и не роняйте прибор
- ✓ Не позволяйте каким либо твердым предметам падать на поверхность или во внутрь сосуда
- ✓ Не царапайте стеклянную поверхность острым предметом

Подготовка установки к работе

1. Для того чтобы повысить точность измерений необходимо, чтобы охлаждение исследуемой жидкости происходило как можно медленнее. Для этого служит воздушная прослойка между внешней и внутренней пробирками. При проведении опыта исследуемую жидкость необходимо постоянно перемешивать для её равномерного охлаждения.
2. Лёд перед проведением эксперимента необходимо измельчить, потом поместить в стеклянный сосуд и смешать с солью.

Выполнение измерений

Упражнение 1. Определение криоскопической константы воды.

1. Положите раздробленный лёд в емкость для криометрических измерений, смешайте лёд с солью KCl.
2. Налейте дистиллированную воду в пробирку так, чтобы уровень жидкости не превышал уровень льда. Осторожно опустите её в прибор и с помощью термопары определите температуру замерзания.
3. Измерьте температуру замерзания заранее приготовленных лаборантом растворов. Для каждого раствора определите температуру замерзания. Для этого налейте раствор в пробирку и определите с помощью термопары температуру замерзания. Пробирку вынимают из льда, осторожно нагревают рукой для расплавления образовавшихся кристаллов льда (при правильном проведении опыта кристаллы должны образовываться в объёме жидкости, а не на стенках пробирки). После того, как все кристаллы расплавились, опыт повторяют. Если разность между первым и вторым полученными значениями t_0 превышает 0.1 С, опыт проводят ещё раз. Проведите измерения для всех готовых растворов.

4. Сосчитайте моляльную концентрацию раствора. Постройте график зависимости измеренной температуры замерзания от моляльной концентрации растворов. По тангенсу угла наклона графика определите криоскопическую константу воды и сравните её с табличным значением.

Упражнение 2. Определение молекулярной массы растворенного вещества криоскопическим методом.

5. Приготовьте раствор соли вещества – неэлектролита, молекулярную массу которого надо определить (по указанию преподавателя или лаборанта), предварительно взвесив вещество m_1 и определив объем дистиллированной воды V . По формуле $m_2 = \rho \cdot V$, где ρ - плотность воды, сосчитайте массу воды.
6. Определите температуру замерзания. Для этого налейте раствор в пробирку и определите с помощью термопары температуру замерзания. Пробирку вынимают из льда и осторожно нагревают рукой для расплавления образовавшихся кристаллов льда (при правильном проведении опыта кристаллы должны образовываться в объеме жидкости, а не на стенках пробирки). После того, как все кристаллы расплавились, опыт повторяют. Если разность между первым и вторым полученными значениями t_0 превышает 0.1 С, опыт проводят ещё раз.
7. Сосчитайте понижение температуры кристаллизации раствора:

$\Delta t_{кр} = t_{кр}(0\%) - t_{кр}$	(3)
--	-----

8. По формуле (4) рассчитайте молекулярную массу растворенного вещества, где K – криоскопическая константа воды, m_1 – растворенного вещества, m_2 – масса воды:

$M = K \frac{1000 \cdot m_1}{m_2 \cdot \Delta t_{кр}}$	(4)
--	-----

9. Сравните полученное значение с табличным. Вычислите относительную ошибку определения молекулярной массы и предельную погрешность метода.

Упражнение 3. Определение степени диссоциации электролита криоскопическим методом.

10. Приготовьте раствор соли вещества – электролита (по указанию преподавателя или лаборанта), предварительно взвесив дистиллированную воду и вещество.
11. Определите температуру замерзания. Для этого налейте раствор в пробирку и определите с помощью термопары температуру

замерзания. Пробирку вынимают из льда и осторожно нагревают рукой для расплавления образовавшихся кристаллов льда (при правильном проведении опыта кристаллы должны образовываться в объеме жидкости, а не на стенках пробирки). После того, как все кристаллы расплавились, опыт повторяют. Если разность между первым и вторым полученными значениями t_0 превышает 0.1 С, опыт проводят ещё раз.

12. По формуле (3) сосчитайте понижение температуры кристаллизации раствора.

13. По формуле (5) рассчитайте изотонический коэффициент Вант-Гоффа, где K – криоскопическая константа воды, m_1 – масса растворенного вещества, m_2 – масса воды, M – молекулярная масса растворенного вещества (табличное значение):

$i = \frac{m_2 \cdot \Delta t_{кр} \cdot M}{1000 \cdot K \cdot m_1}$	(5)
--	-----

14. По формуле (6) рассчитайте степень диссоциации электролита.

$$\alpha = \frac{i - 1}{\nu - 1}, \quad (6)$$

где ν – число ионов, образующихся при диссоциации молекулы электролита.

15. Сравните полученное значение с табличным. Вычислите относительную ошибку определения изотонического коэффициента Вант-Гоффа и предельную погрешность метода.

236. ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ПАРА ВОДЫ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

Введение

Принцип работы водоструйного вакуумного насоса

С помощью водоструйного насоса можно получать давления порядка 10 мм.рт.ст.

Устройство водоструйного насоса показано на рис. 1. В герметичную камеру насоса входят три трубки. Струя воды подается в трубку А, в которой имеется сужение, вставленное с небольшим зазором в воронку другой трубки (В), через которую вода уходит из насоса. Откачиваемый объем соединяется с камерой через трубку С.

Для понимания действия насоса необходимо знать закон Бернулли и уравнение непрерывности тока для идеальной жидкости.

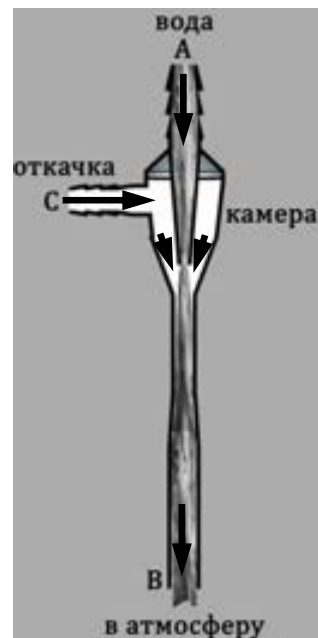


Рис. 1. Устройство водоструйного насоса

Закон Бернулли

Закон (уравнение) Бернулли является следствием закона сохранения энергии для стационарного потока идеальной (то есть без внутреннего трения) несжимаемой жидкости вдоль любой трубки тока:

$$\frac{\rho v^2}{2} + \rho gh + p = \text{const}, \quad (1)$$

где ρ – плотность жидкости, v – скорость движения жидкости, g – ускорение свободного

падения, h – высота над поверхностью Земли. Слагаемое $\frac{\rho v^2}{2}$

представляет собой объемную плотность кинетической энергии, ρgh – потенциальной энергии в поле внешних сил, а p – потенциальной энергии упругой деформации (давление). Их сумма определяет полную энергию единицы объема жидкости, которая в отсутствии диссипации является постоянной величиной в различных поперечных сечениях трубки тока жидкости.

Константа в правой части часто называется полным давлением и зависит, в общем случае, от линии тока жидкости.



Даниил Бернулли
(1700—1782)

Полное давление состоит из весового (ρgh), статического (p) и динамического ($\frac{\rho v^2}{2}$) давлений.

Из закона Бернулли следует, что при уменьшении сечения потока, из-за возрастания скорости, то есть динамического давления, статическое давление падает.

Уравнение непрерывности тока идеальной жидкости

Уравнение непрерывности тока несжимаемой жидкости выглядит так:

$$S_1 v_1 = S_2 v_2, \quad (2)$$

где S_1 и S_2 – площади поперечных сечений трубки тока, v_1 и v_2 – скорости жидкости в этих сечениях.

Если высота сечений трубки тока меняется на небольшую величину, а их диаметры сильно отличаются (как это имеет место в нашем случае), можно пренебречь изменением потенциальной энергии в поле силы тяжести и использовать уравнение (1) в виде:

$$\frac{\rho v_1^2}{2} + p_1 = \frac{\rho v_2^2}{2} + p_2. \quad (3)$$

Из (2) следует, что при переменном сечении трубки тока жидкость движется с ускорением. Согласно уравнению (3) это ускорение обусловлено непостоянством давления вдоль трубки – в местах, где скорость меньше, давление больше, что приводит к ускорению жидкости при перетекании ее в узкие места трубки тока.

Принцип действия насоса состоит в том, что вода, двигаясь с большой скоростью в узком отверстии верхней трубки (см. рис. 1 и уравнение (2)), увлекает за собой воздух из зазора между трубками. Так как прилегающие к струе слои воздуха движутся, давление в них (см. уравнение (3)) падает, что вызывает приток воздуха в зазор из камеры. Давление в камере уменьшается. С точки зрения гидродинамики процесс откачки прекратится, когда давление в камере станет равным давлению в струе жидкости, которое тем меньше, чем больше скорость струи.

Зависимость давления насыщенного пара воды от температуры

Если при данных значениях температур и давления относительные количества пара и жидкости не меняются, то такой пар называют насыщенным. Связь давления насыщенного пара и температуры определяется уравнением Клапейрона-Клаузиуса. Из него, с учетом уравнения состояния идеального газа, а также того, что в условиях далеких от критических, объем жидкости на несколько порядков меньше объема газа, следует:

$$\frac{dP}{dT} = \frac{L}{TV} = \frac{LP}{T^2 R} \quad (4)$$

Интегрируя последнее уравнение в предположении, что L не зависит от температуры, получаем.

$$\ln P = -\frac{L}{TR} + C, \quad (5),$$

где C – константа, характерная для данной жидкости.

Тангенс угла наклона графика этой зависимости, построенной в координатах $\ln P$ $1/T$, очевидно равен L/R . Значит, из изменений температурной зависимости давления насыщенного пара данного вещества можно определить значение его скрытой молярной теплоты испарения L .

Удельная теплота парообразования и конденсации (L) — физическая величина, характеризующая количество теплоты, которое необходимо сообщить 1 кг вещества, взятому при температуре кипения, чтобы перевести его из жидкого состояния в газообразное, равна теплоте, выделяемой при конденсации пара, взятого при температуре кипения, в жидкость.

Таблица 1. Давление насыщающего водяного пара P в зависимости от температуры

t, °C	P, кПа	t, °C	P, кПа	t, °C	P, кПа	t, °C	P, кПа	t, °C	P, кПа
0,00	0,61	8,00	1,07	16,00	1,80	24,00	2,96	32,00	4,71
0,50	0,63	8,50	1,11	16,50	1,87	24,50	3,04	32,50	4,84
1,00	0,65	9,00	1,15	17,00	1,92	25,00	3,13	33,00	4,99
1,50	0,68	9,50	1,17	17,50	1,95	25,50	3,23	33,50	5,12
2,00	0,71	10,00	1,21	18,00	1,99	26,00	3,33	34,00	5,27
2,50	0,73	10,50	1,27	18,50	2,08	26,50	3,43	34,50	5,41
3,00	0,76	11,00	1,31	19,00	2,17	27,00	3,53	35,00	5,57
3,50	0,79	11,50	1,35	19,50	2,24	27,50	3,64	35,50	5,73
4,00	0,81	12,00	1,39	20,00	2,32	28,00	3,75	36,00	5,89
4,50	0,84	12,50	1,44	20,50	2,39	28,50	3,85	36,50	6,05
5,00	0,87	13,00	1,48	21,00	2,47	29,00	3,96	37,00	6,23
5,50	0,89	13,50	1,53	21,50	2,53	29,50	4,08	37,50	6,40
6,00	0,93	14,00	1,59	22,00	2,61	30,00	4,20	38,00	6,57
6,50	0,96	14,50	1,64	22,50	2,69	30,50	4,32	38,50	6,74
7,00	1,00	15,00	1,69	23,00	2,79	31,00	4,45	39,00	6,93
7,50	1,03	15,50	1,75	23,50	2,87	31,50	4,57	39,50	7,12

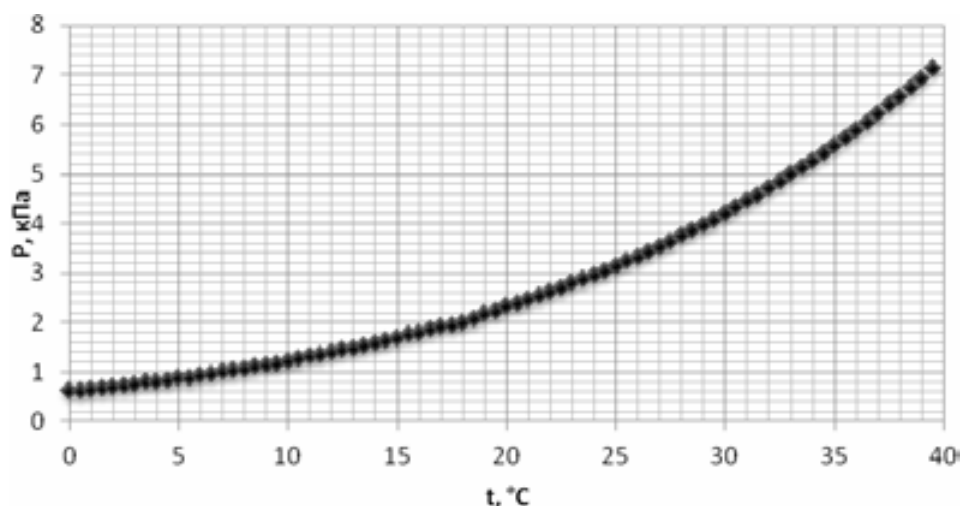


Рис. 2. График зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры

Цель работы

знакомство с проблемой исследования равновесных состояний многофазных систем;.

Решаемые задачи

1. освоение приемов работы с водоструйным насосом;
2. измерение зависимости давления насыщенного водяного пара от температуры;
3. измерение температурной зависимости скрытой теплоты парообразования воды;
4. измерение температурной зависимости скачка энтропии при испарении воды.

Техника безопасности

Внимание: в работе используется стекло.

Будьте предельно аккуратны при работе с жидкостями при высокой температуре.

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

1. вентиль
2. манометр
3. пластиковый водоструйный насос
4. стеклянный тройной кран
5. стеклянный вакууммируемый сосуд с двумя горлышками
6. термopара
7. вакуумметр Cassy
8. блок Cassy
9. персональный компьютер
10. трубки резиновые вакуумные
11. держатель
12. CASSY Lab 2

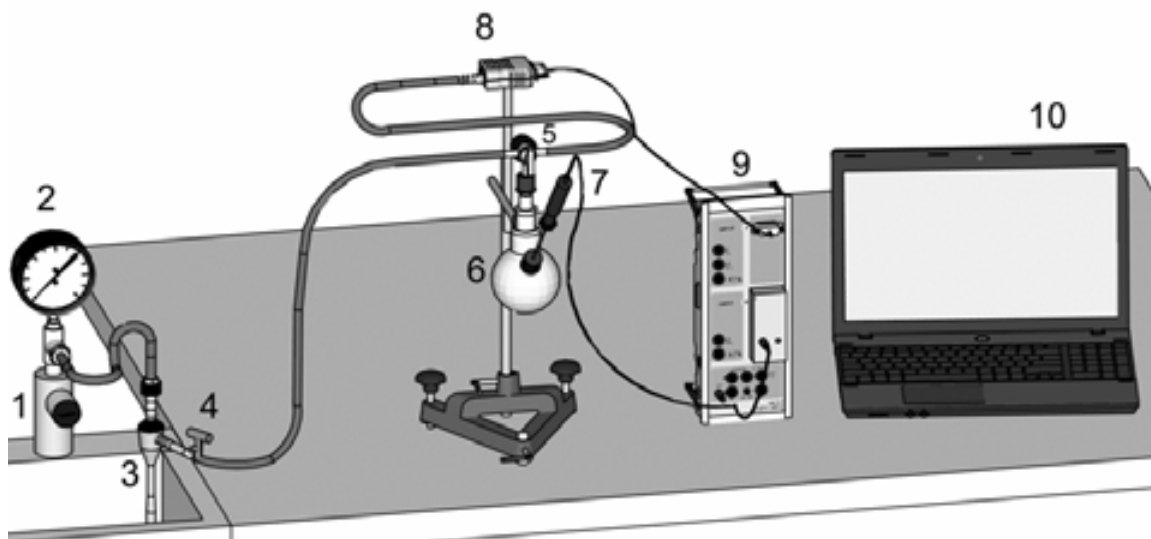


Рис.3 Экспериментальная установка для исследования работы водоструйного вакуумного насоса

В работе необходимо исследовать зависимость давления насыщенного водяного пара от температуры.

Схема установки представлена на рис. 3. Вода через вентиль (1) и манометр (2) подается в пластиковый водоструйный насос (3) и сливается в раковину. Отсасывающий штуцер насоса подсоединен к крану (4) и к тройнику (5), соединённым с вакууммируемым сосудом (6) с двумя горлышками. Боковое гнездо закрыто пробкой с термопарой (7). Давление в этом сосуде контролируется с помощью вакуумметра (8). Показания термопары и вакуумметра передаются на блок Cassy (9) и затем на персональный компьютер (10).

Порядок выполнения работы

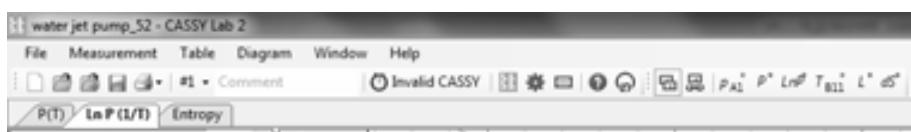
Подготовка установки к работе

1. Проверьте, что сосуд без жидкости герметично соединен с водоструйным насосом и вакуумметром через стеклянный тройник с помощью резиновых вакуумных трубок (см рис 3)
2. Конец термопары должен быть вставлен в пробку на боковом гнезде сосуда
3. Запустите на компьютере программу Cassy Lab 2.

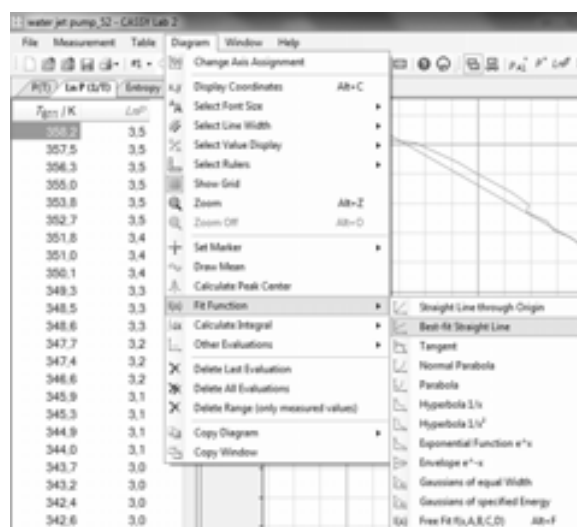
Упражнение 1. Исследование зависимости давления насыщенного пара воды от температуры

1. Запустите на компьютере программу Cassy Lab 2.

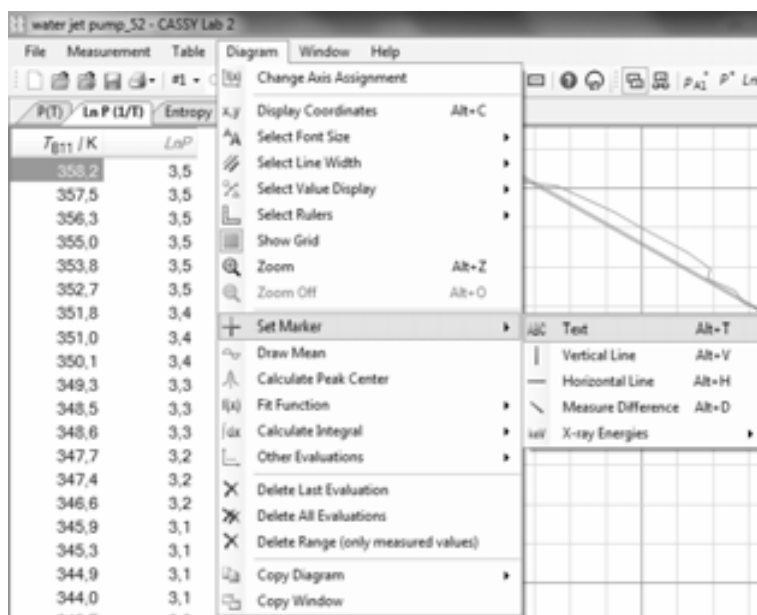
- Отсоедините колбу от вакуумной системы.
- Осторожно налейте в колбу кипяток (предварительно ополоснув) так, чтобы кончик термопары погрузился в него.
- Подсоедините колбу к вакуумной системе.
- Включите откачку колбы, установите входное давление воды около 250 кПа и дождитесь закипания воды в колбе.
- Нажмите клавишу F9 на компьютере для начала измерений. На экране появятся результаты измерения температуры T и давления $P_{\text{кам}}$ в сосуде.
- Измерьте зависимость давления $P_{\text{кам}}$ от температуры воды T в колбе по мере остывания до комнатной температуры.
- Поверните тройной стеклянный кран так, чтобы давление в колбе стало равным атмосферному.
- Закройте кран.
- Пронаблюдайте на экране компьютера график зависимости $P_{\text{кам}}(T)$.
- Сравните полученные данные с зависимостью давления насыщенного пара воды от температуры по справочным данным (Таблица 1, Рис. 2).
- Перейдите в закладку «Ln P (1/T)»:



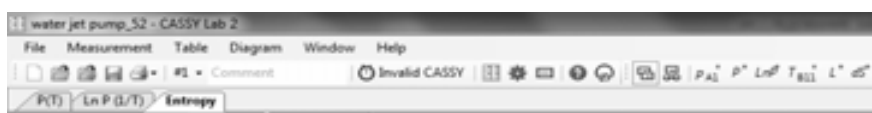
- Пронаблюдайте на экране компьютера график зависимости давления насыщенного пара воды от температуры в координатах LnP и (1/T).
- Вычислите тангенс угла наклона. Для этого зайдите во вкладку «Diagram», из пункта «Fit Function» выберите «Best-fit-Straight Line».



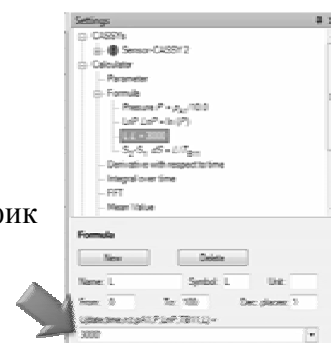
15. Наведите курсор мыши на левую верхнюю точку графика и, зажав левую кнопку, потяните курсор вдоль экспериментальной прямой (при этом прямая будет выделяться цветом). Отпустите левую кнопку мыши.
16. Во вкладке «Diagram» перейдите в пункт «Set Marker» и выберите «Text»



17. На экране появится уравнение прямой и его параметры. Параметр А соответствует тангенсу наклона прямой.
18. По тангенсу наклона вычислите скрытую молярную теплоту испарения воды L (см. уравнение 5).
19. Сравните полученный результат с табличным значением.
20. Перейдите во вкладку «Entropy»



21. Задайте полученное вами значение L в окне «Settings».
22. Имея ввиду, что $L = T(S_2 - S_1)$, пронаблюдайте на экране график зависимости энтропии воды ($S_2 - S_1$) при кипении от T .



2411. ПРЕВРАЩЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОТУ

Введение

Энергия является одной из основных физических величин. Энергия имеет различные формы, которые могут преобразовываться из одной в другую. В замкнутых системах, в процессе перехода полная энергия сохраняется. В данной работе устанавливается соотношение механической и тепловой энергии. Механическая работа затрачивается на преодоления сил трения при прокручивании шнура. При этом повышается температура в калориметре и, следовательно, увеличивается тепловая энергия. Два вида энергии, механическая и тепловая, могут быть получены и рассчитаны из числа оборотов и температуры.

Цель работы

Получение соотношения между механической энергией и тепловой энергией (теплотой) при их преобразовании в данной экспериментальной установке

Решаемые задачи

- ✓ измерение температуры с помощью термопары
 - ✓ использования калориметра для измерения теплоты
 - ✓ экспериментальное наблюдение преобразование работы силы трения в теплоту
-

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ компьютерный интерфейс для регистрации экспериментальных данных сенсор-CASSY 2 (①, Рис.1)
 - ✓ водяной калориметр (②, Рис.1)
 - ✓ медный калориметр (③, Рис.1)
 - ✓ алюминиевый калориметр (④, Рис.1)
 - ✓ большой алюминиевый калориметр (⑤, Рис.1)
 - ✓ термопара (⑥, Рис.1)
 - ✓ световые ворота (⑦, Рис.1)
 - ✓ груз, 5 кг (⑧, Рис.1)
 - ✓ вращающий механизм (⑨, Рис.1)
-

Порядок выполнения работы

Требования безопасности

- ✓ Убедитесь в том, что экспериментатор стоит так, что он или она не подвержен опасности, если вдруг, по неосторожности, упадет груз.

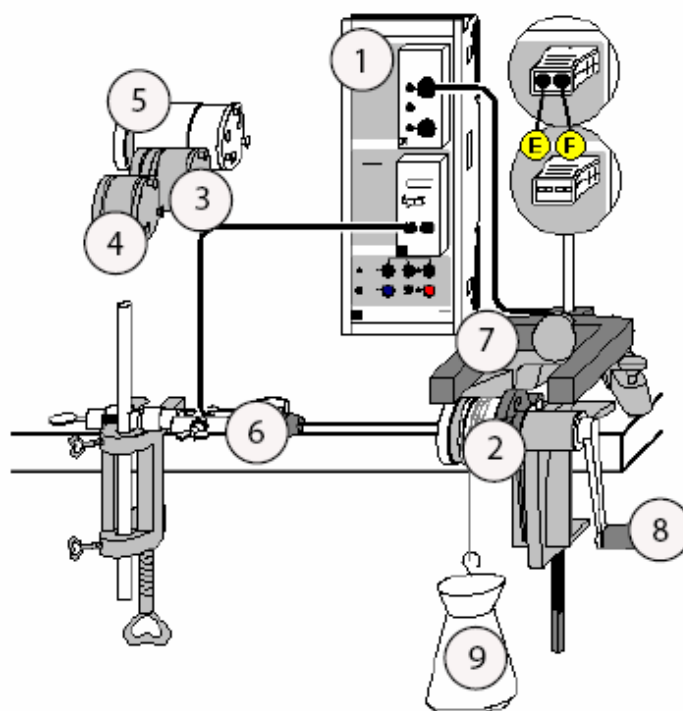


Рис.1. Схема установки

Подготовка установки к работе

1. Проверьте правильность сборки установки (см. рис. 1).
2. Установите водяной калориметр отверстием вверх и залейте воду до края.
3. Вставьте уплотнение в отверстие и закрепите его блокировочным винтом.
4. Закрепите наполненный калориметр в основном механизме (см. рис. 1). Для этого вставьте штифт в углубление пластмассового держателя и поворотом тела калориметра заблокируйте штифт в пазе.
5. Вставьте термопару в калориметр как можно глубже. Подтяните блокировочный винт. Закрепите ручку термопары в заранее подготовленный держатель (см. рис. 1).
6. Намотайте шнур (4, максимум 6 оборотов) на калориметр.
7. Подвесьте груз так, чтобы при вращении ручки вращательного механизма, шнур проскальзывал и груз оставался на постоянной высоте (несколько сантиметров) от пола. Если он поднимается (опускается) уменьшить (увеличить) число витков шнура на калориметре.
8. Для измерения числа оборотов, положение световых ворот должно быть таким как указано на рисунке 1. Световые ворота должны быть подключены к входу А сенсор-CASSY.

9. Проверьте подсоединение датчика температуры через температурный блок к входу **B** сенсор-CASSY через «временной» блок.
10. Запустите на ноутбуке CASSY Lab 2. Загрузите настройки для работы. (File-Open; D:\эксперименты\2332).
11. В настройках CASSY обнулите значения числа оборотов (Sensor-CASSY2 – Input A₁ – Time; |→0←|), задайте теплоемкость калориметра ($C=40+4.2$ Дж/К, 4.2 Дж/К – теплоемкость воды) (Calculator – Formula – Heat capacity).

Выполнение измерений

12. Запустите эксперимент в CASSY (F9).
13. Крутите ручку вращательного механизма. Необходимо следить, чтобы веревка не наматывалась на калориметр. Остановить эксперимент при достижении температуры 30⁰С (F9).
14. Повторить эксперимент для медного калориметра ($C=264+4.2$ Дж/К), алюминиевого калориметра ($C=188+4.2$ Дж/К) и большого алюминиевого калориметра ($C=384+4.2$ Дж/К).

Обработка и представление результатов

В течение эксперимента температура калориметра постоянно отображается как функция числа оборотов. Механическая энергия E_m равна произведению величины силы трения F и длины шнура s , намотанного на калориметр:

$$E_m = FS,$$

$$F = mg,$$

$$s = N\pi d,$$

где m – масса груза, g – ускорение свободного падения, N – число витков, d – диаметр калориметра, равный 47 мм.

Увеличение тепловой энергии обусловлено увеличением температуры и определяется как:

$$E_{th} = C(\theta_2 - \theta_1),$$

где C – теплоемкость калориметра и воды, θ_1 и θ_2 – начальная и конечная температуры, соответственно.

На вкладке Evaluation, тепловая энергия строится в зависимости от механической энергии.

15. Аппроксимируйте экспериментальные точки E_{th} от E_m прямой линией, проходящей через начало координат.
16. Проанализируйте соотношение между механической энергией и тепловой энергией по тангенсу угла наклона аппроксимационной прямой для всех калориметров.

2412. ПРЕВРАЩЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ТЕПЛОВУЮ ЭНЕРГИЮ

Введение

Энергия есть мера запасенной работы (энергия в физике отождествляется со способностью произвести работу). Она проявляется в различных формах, которые могут переходить из одной в другую. В замкнутой системе в процессе превращения полная энергия сохраняется, таким образом, энергия является одной из основных физических величин.

В данной лабораторной работе опытным путем устанавливается эквивалентность электрической энергии (работы электрического поля по перемещению электрического заряда в проводнике) и тепловой энергии. Электрическая энергия преобразуется в тепловую энергию (теплоту) в результате нагрева металлической спирали, погруженной в воду. Это приводит к повышению температуры воды в калориметре и самого калориметра. Электрическая и тепловая энергии рассчитываются и сравниваются между собой в процессе измерения.

Цель работы

Проверка закона сохранения энергии при преобразовании электрической энергии в тепловую энергию.

Решаемые задачи

- ✓ измерение температуры с помощью термопары
- ✓ использования калориметра для измерения теплоты
- ✓ экспериментальное наблюдение преобразование работы электрического поля по перемещению электрического заряда в проводнике в теплоту

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ компьютерный интерфейс для регистрации экспериментальных данных сенсор-CASSY 2 (①, Рис.1)
- ✓ медный калориметр (②, Рис.1)
- ✓ алюминиевый калориметр (③, Рис.1)
- ✓ большой алюминиевый калориметр (④, Рис.1)
- ✓ датчик температуры (термопара NiCr-Ni) (⑤, Рис.1)
- ✓ источник пониженного переменного и постоянного напряжения (⑥, Рис.1)

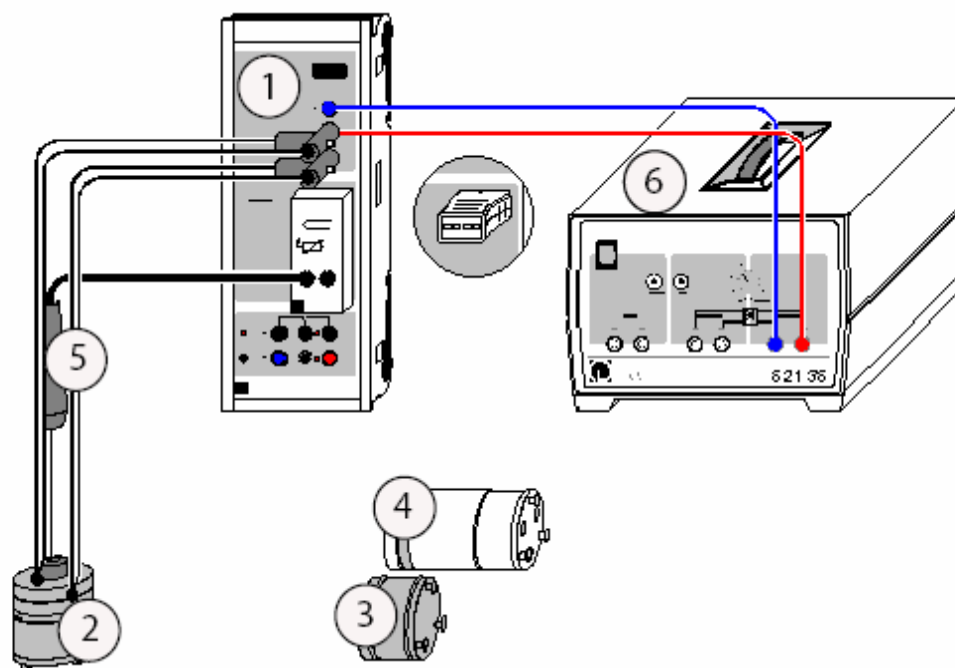


Рис.1

Подготовка установки к работе

1. Установите медный калориметр отверстием вверх и залейте воду до края.
2. Вставьте уплотнение в отверстие и закрепите его блокировочным винтом.
3. Вставьте датчик температуры как можно глубже в отверстие калориметра и затяните блокировочный винт калориметра.
4. Подключите источник напряжения к сенсор-CASSY как показано на рисунке.
5. Подключить нагреватель калориметра к входу А сенсор-CASSY (см. рисунок).
6. Подсоедините датчик температуры через температурный блок к входу В сенсор-CASSY.

Выполнение измерений

7. Запустите на ноутбуке CASSY Lab 2. Загрузите настройки для работы: File-Open; D:\эксперименты\2343.
8. В настройках CASSY вывести показания напряжения: Sensor-CASSY2 – Input A₁ – Voltage U_{A1}.
9. Включить источник напряжения. Вращая ручку выставить напряжение U_{A1} примерно 9 В.
10. Прочитать точное значение U_{A1} и ввести его в [Setting U](#) как параметр.
11. Выключить источник напряжения. Выбрать Current I_{A1} в качестве измеряемой величины и 0 .. 2.1 А, как диапазон в [Setting UA1](#).

12. В настройках [Setting C](#) задайте теплоемкость медного калориметра и воды ($264+4.2$ Дж/К) (Calculator – Formula – Heat capacity).
13. Запустить эксперимент в CASSY (F9).
14. Если начальная температура не изменяется со временем, включить источник напряжения.
15. Выключить источник напряжения при достижении конечной температуры 30°C .
16. Остановить эксперимент в CASSY (F9) при неизменной конечной температуре.
17. Повторить эксперимент для алюминиевого калориметра ($C=188+4.2$ Дж/К) и большого алюминиевого калориметра ($C=384+4.2$ Дж/К).
18. Посмотреть соотношение между механической энергией и тепловой для всех калориметров на диаграмме во вкладке Evaluation.

Обработка и представление результатов

Сила тока I_{A1} и температура θ_{B11} измеряются и отображаются на графике в зависимости от времени в процессе эксперимента. Работа электрического поля по перемещению электрического заряда в проводнике (электрическая энергия) равна:

$$E_{el} = U \cdot I \cdot \Delta t,$$

где Δt – время в течении которого происходит нагрев. Тепловая энергия определяется выражением:

$$E_{th} = C (\theta_2 - \theta_1),$$

где C - теплоемкость калориметра и воды, θ_1 и θ_2 – начальная и конечная температуры, соответственно. E_{th} строится в зависимости от E_{el} на диаграмме во вкладке Evaluation.

19. Аппроксимируйте экспериментальные точки E_{th} от E_{el} прямой линией, проходящей через начало координат.
20. Проанализируйте соотношение между электрической энергией и тепловой энергией по тангенсу угла наклона аппроксимационной прямой для всех калориметров.

2421. ФРИКЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ДВИГАТЕЛЕ, РАБОТАЮЩЕМ НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ

Введение

Принцип работы теплового двигателя на нагретом воздухе. За один оборот двигатель потребляет количество теплоты Q_1 из резервуара 1, совершает механическую работу W и передает энергию $Q_2 = Q_1 - W(I)$ в резервуар 2. Если двигатель на горячем воздухе работает в качестве холодильника, то механическая работа W совершается извне, при этом направления вращения совпадают. В этом случае также количество тепла Q_1 берется из резервуара 1, и количество тепла Q_2 передается в резервуар 2. В обоих случаях происходят потери энергии, которые входят в энергетический баланс двигателя горячего воздуха. Например, определенное количество механической энергии (фрикционные работы) за один оборот расходуется на трение поршня в цилиндре, таким образом, трение превращается в тепловую энергию (тепло). Фрикционные потери, связанные с работой поршня в цилиндре могут быть определены количественно, так как вызывают нагревание охлаждающей воды. В эксперименте, потери энергии на преодоления сил трения при работе поршня определяется путем измерения повышения температуры воды в цикле охлаждения, двигатель горячего воздуха приводится в движение электрическим двигателем, головка цилиндров остается открытой. Энергия, которая передается охлаждающей воде, рассчитывается по формуле:

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta \vartheta \quad (1)$$

$c=4.185$ Дж/(гр·К) удельная теплоемкость воды; $\rho=1$ гр/см³ плотность воды

$\frac{\Delta V}{\Delta t}$ объем воды, протекающей в единицу времени, расходующейся на охлаждение воды.

Работа сил трения за один оборот двигателя на горячем воздухе рассчитывается по

формуле: $W_R = \frac{P}{f}$.

Цель работы

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутым циклам

Решаемые задачи

- ✓ Определение потерь на трение в воздушном двигателе, по нагреванию воды охлаждающего цикла.
- ✓ Вычисление полезной работы двигателя

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ Двигатель на горячем воздухе
- ✓ Принадлежности для измерения мощности
- ✓ Двигатель
- ✓ Блок управления двигателем

- ✓ Счетчик
- ✓ П – образные световые ворота
- ✓ Многожильный кабель
- ✓ Секундомер
- ✓ Термометр
- ✓ V- образный штатив
- ✓ Штативный стержень
- ✓ Пластиковый стакан
- ✓ Водяной насос
- ✓ Низковольтный источник питания
- ✓ Силиконовая подводка
- ✓ Резервуар для воды 10 л

Порядок выполнения работы

Подготовка эксперимента. Сборка установки

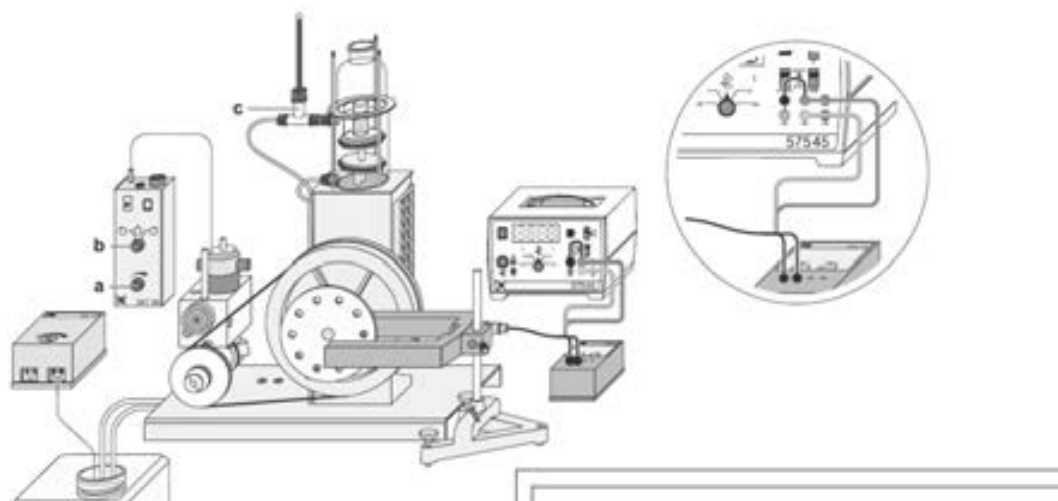


Рис.1

1. Снимите закручивающийся колпачок на выходе из головки цилиндра с трубок, по которым течет охлаждающая вода. Вставьте термометр в температурную вставку, и зажмите его с помощью гайки GL18.

Охлаждение двигателя:

2. Заполните канистру примерно 10 л воды.
3. Подключите выход насоса к трубке, по которой втекает в двигатель поток охлаждающей воды, и опустите насос в воду, направьте слив воды из двигателя в канистру.
4. Подключите насос к источнику питания низкого напряжения диапазон 12В. При необходимости, ослабьте шайбу GL на короткое время, позволяя воде подняться немного в стеклянную трубку, потом закрепите шайбу GL.

Настройка двигателя на горячем воздухе:

5. Поставьте электродвигатель, и подключить его к блоку управления.
6. Установите приводной ремень на маховик диска, и присоедините его к поворотному колесу электрического двигателя.

Измерение частоты:

7. Приложите диск с отверстиями от аксессуаров для двигателя горячего воздуха к коленчатому валу.
8. Консоль для измерения частоты включить в розетку, с помощью кнопки «mode» установить измерение частоты, горит индикатор «Hz», вход «E».
9. Направление луча света приведите в соответствие с отверстием, расположенным на диске.

Требования безопасности

- ✓ До проведения каждого эксперимента, убедитесь, что горячая пластина помещена в пазы и нагретая нить не касается перемещающегося поршня.
- ✓ Нагретая часть двигателя может стать очень горячей, шатуны при движении и перемещения поршней могут вызвать травмы при работе двигателя. По этой причине всегда используйте защитный чехол от прикосновений, когда двигатель работает.
- ✓ Никогда не используйте двигатель без охлаждающего потока воды. Вы можете соединить двигатель с краном с водопроводной водой или использовать циркуляционный насос с резервуаром; в этом случае рекомендовано использование дистиллированной или кипячёной (без окалины) воды. Если поток уменьшился при использовании водопроводной воды, промойте всю систему теплой (без окалины) водой. Циркуляция воды должна быть безупречна. Не допускайте перегрева. Когда вода попадает в контур охлаждения, температура охлаждающей воды не должна превышать 30° С.
- ✓ Смазывайте два цилиндра двигателя силиконовым маслом регулярно. Самый простой способ сделать это - убрать горячую пластину, подвинуть перемещающийся поршень к нижней мёртвой точке, с помощью соломинки капнуть силиконового масла из сжатой бутылки, так чтобы оно потекло вниз по стенке цилиндра на вершину поршневого кольца. Так как перегородка не полностью непроницаема, необходимое масло достигнет нижнего поршневого кольца за короткое время.
- ✓ Никогда не подключайте сетевую обмотку (56221) без сердечника трансформатора.

Выполнение эксперимента

1. Установите переключатель (a) в среднее положение (режим ожидания),
2. Установите ручку настройки скорости (b) в среднюю позицию, и включите блок управления.
3. Включите циркуляцию воды, для этого включите источник низковольтного питания.
4. Проверьте циркуляцию, ждите, пока вода не побежит обратно через выпускающую трубу.
5. Переключайте выключатель двигателя на горячем воздухе в направлении по часовой стрелке рукоятка (a) влево.

6. Измерьте частоту вращения двигателя горячего воздуха. Скорость вращения двигателя получается из измеренной частоты и количества отверстий диска.
7. Измерение температуры воды проводить через каждые 2 минуты, и ждать, пока температура не стабилизируется.
8. Когда температура достигнет своего максимального значения, выключите двигатель, рукоятка (а) в среднем положении, продолжайте измерения температуры охлаждающей воды каждые 2 минуты, пока температура не стабилизируется.
9. Положите конец выходной трубки для охлаждающей воды в пластмассовый стаканчик, и определить объем вытекающей воды ΔV за время Δt (см. рис 2.).
10. Измените скорость вращения электродвигателя с помощью ручки настройки скорости (b), и повторите измерения (12-15) для пяти значений частоты.

Обработка и представление результатов

11. Результаты измерений занесите в таблицу 1, и постройте график зависимости температуры охлаждающей воды от времени для каждой частоты вращения двигателя.

Таблица 1. Температура охлаждающей воды, измеренной с интервалом в 2 минуты

t (мин)	$\theta^{\circ}\text{C}$

12. Из графиков установите абсолютную величину изменения температуры, и результаты занесите в таблицу и постройте график зависимости изменения температуры от частоты.

Таблица 2: Изменения температуры охлаждающей воды и работы, измеренной при различных частотах вращения двигателя

$f(\text{сек}^{-1})$	$\Delta\theta^{\circ}\text{C}$	$W_R(\text{Дж})$

13. Рассчитайте величину силы трения за один оборот, при разных частотах вращения двигателя, постройте график зависимости работы сил трения от частоты вращения двигателя.

Замечание. Мощность двигателя составляет $P = W f$, где f частота холостого хода или скорость. Вы можете определить частоту f с помощью светового барьера и счетчика. Другим способом является использование изображения частотного спектра Frequency Spectrum (нажмите на эту вкладку с помощью мыши). Однако, лучшее частотное разрешение требует больших измеренных значений, чем записано в примере (увеличьте число от 125 до, например, 2000 в диалоговом окне Параметры измерения Measuring Parameters dialog).

2422. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК НАГРЕВАТЕЛЬ

Введение

При работе тепловой машины двигатель забирает энергию Q_1 из первого резервуара (нагревателя), совершает полезную работу W и отдает энергию Q_2 второму резервуару (холодильнику). Если нет никаких потерь энергии, то следующее соотношение между величинами должно соблюдаться:

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (1)$$

Двигатель на горячем воздухе не является оптимальным, так как происходит потери тепла на тепловое излучение и нагревание. Следовательно,

$$Q_1 > Q_2 + W \quad (2)$$

Коэффициент полезного действия определяется выражением:

$$\eta = \frac{W}{Q_1}. \quad (3)$$

В случае двигателя на горячем воздухе наиболее корректно использовать соотношение:

$$\eta = \frac{W}{Q_2 + W}. \quad (4)$$

Энергия Q_2 затрачивается на нагревание охлаждающей двигатель воды, повышение её температуры. Однако, повышение температуры также обусловлено работой сил трения (см. работу 2421). В уравнении теплового баланса дополнительно к механической работе должны рассматриваться потери энергии на работу сил трения.

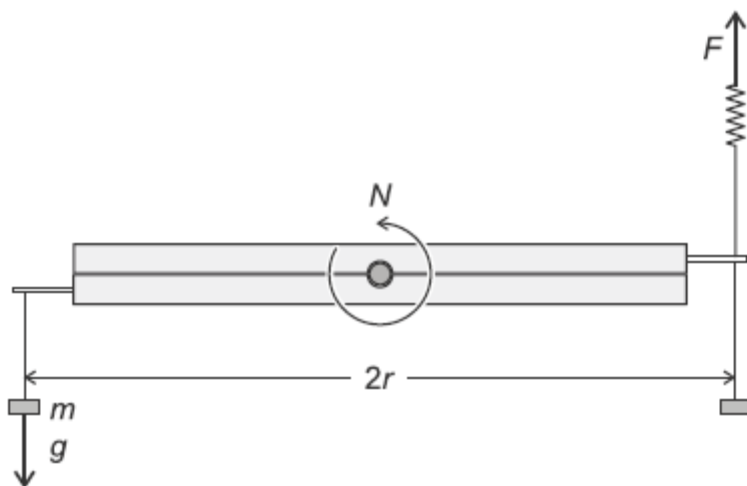


Рис.1. Вращающий момент $N=(F+mg) \cdot r$.

В эксперименте двигатель вращает с частотой f . Тогда затраченная энергия равна:

$$W' = 2\pi \cdot N \quad (5)$$

Механическая работа определяется выражением:

$$W = W' + W_R. \quad (6)$$

Увеличение температуры холодной воды требует дополнительной энергии в единицу времени, которая равна:

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta \vartheta, \quad (7)$$

$c = 4,185$ Дж/(г·К) - удельная теплоемкость воды, $\rho = 1$ г/см⁻³ - плотность воды, $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ -

объем вытекающей воды, который может быть измерен. Исходя из этих соотношений, можно рассчитать теплоту Q_2' , которая передается охлаждающей воде за один цикл, как:

$$Q_2' = \frac{P}{f}, \quad (8)$$

где f – частота вращения. Разность между $Q_2 = Q_2' - W_R$ позволяет рассчитать энергию, которая передается резервуару 2.

Цель работы

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутым циклам

Решаемые задачи

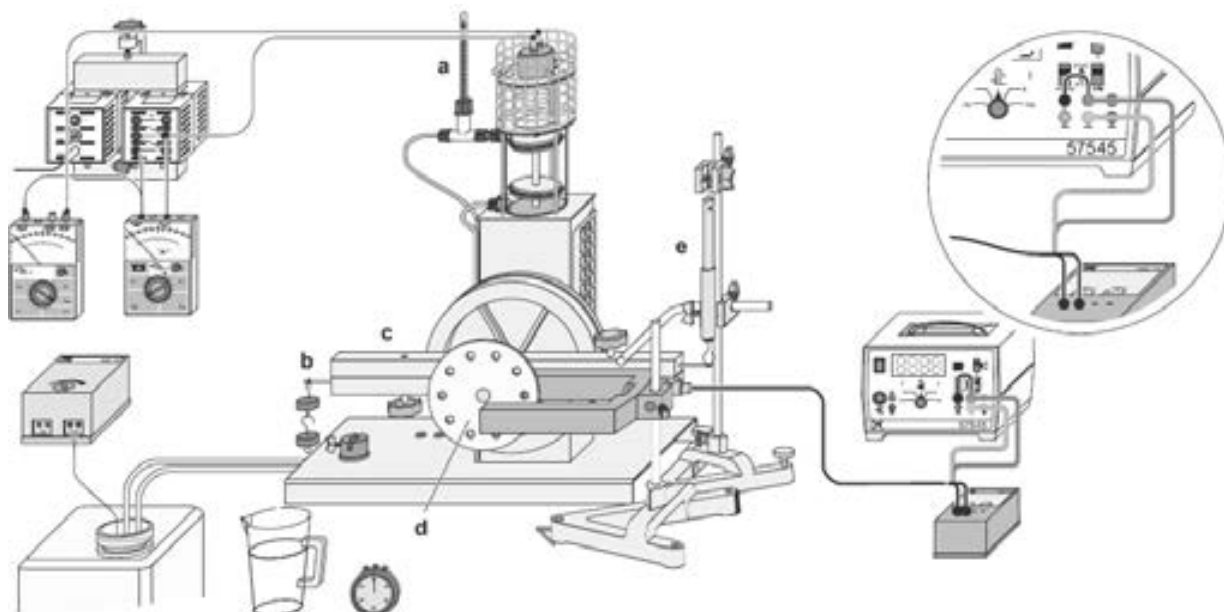
- ✓ Определение потерь на трение в воздушном двигателе, по нагреванию воды охлаждающего цикла.
- ✓ Вычисление коэффициента полезного действия нагревателя.

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ Sensor-CASSY 524013
- ✓ CASSY Lab2 524220
- ✓ Источник тока 524031
- ✓ датчик вращательного движения S 524082
- ✓ Vbox 524038
- ✓ датчиком давления и 529038
- ✓ Двигатель на горячем воздухе 388182
- ✓ Кордовая нить
- ✓ Винтовая пружина из 35208ET2
- ✓ U-сердечник с вилкой 56211
- ✓ Зажимное устройство с пружинным зажимом 562121
- ✓ катушка индуктивности, 500 витков 56221
- ✓ низковольтная катушка индуктивности, 50 витков 56218
- ✓ ПВХ трубки, \varnothing 8 мм 307 70
- ✓ Водяной насос 12 B388181
- ✓ Низковольтный источник питания 521231
- ✓ Соединительные провода, 100 см, черный 50133
- ✓ Резервуар для воды 10 л

Подготовка эксперимента. Сборка установки



1. Снимите закручивающийся колпачок на выходе из головки цилиндра с трубок, по которым течет охлаждающая вода. Вставьте термометр в температурную вставку, и зажмите его с помощью гайки GL18.

Охлаждение двигателя:

2. Заполните канистру примерно 10 л воды.
3. Подключите выход насоса к трубке, по которой втекает в двигатель поток охлаждающей воды, и опустите насос в воду, направьте слив воды из двигателя в канистру.
4. Подключите насос к источнику питания низкого напряжения диапазон 12В. При необходимости, ослабьте шайбу GL на короткое время, позволяя воде подняться немного в стеклянную трубку, потом закрепите шайбу GL.

Настройка двигателя на горячем воздухе:

5. Поставьте электродвигатель, и подключите его к блоку управления.
6. Установите приводной ремень на маховик диска, и присоедините его к поворотному колесу электрического двигателя.

Подключение питания:

7. Установите нить на головку блока цилиндров с крышкой. Поверните маховик, проверьте, насколько плотно закрыт двигатель на горячем воздухе, при необходимости закройте пробкой штуцер датчика давления.

8. Установите съемной трансформатор, и подключите 12-V вывод на 4-мм разъемы головки блока цилиндров вместе с вольтметром и амперметром

Измерение частоты.

9. Приложите диск (d) с отверстиями от аксессуаров для двигателя горячего воздуха к коленчатому валу.
10. Установите диск с отверстиями в подставке, на расстоянии 20 см, и выровняйте его в соответствии с отверстиями перфорированного диска, диск находится в покое.
11. Подключить 4-полюсный кабель адаптера к разъему 6V на выходе трансформатора (черный заглушки) и к входу счетчика Р (частота измерения, красный и серый разъем).
12. Установите переключатель в положение "f" и включите счетчик Р.

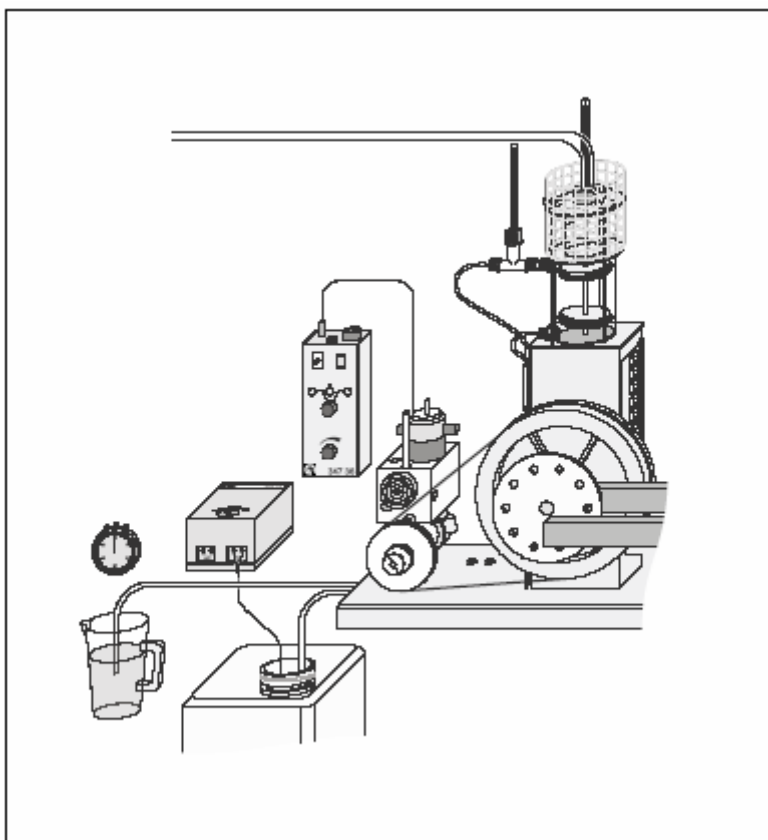


Рис.2. Определение объема вытекающей воды ΔV за время Δt .

Требования безопасности

- ✓ До проведения каждого эксперимента, убедитесь, что горячая пластина помещена в пазы и нагретая нить не касается перемещающегося поршня.
- ✓ Нагретая часть двигателя может стать очень горячей, шатуны при движении и перемещения поршней могут вызвать травмы при работе двигателя. По этой причине всегда используйте защитный чехол от прикосновений, когда двигатель работает.

- ✓ **Никогда не используйте двигатель без охлаждающего потока воды. Вы можете соединить двигатель с краном с водопроводной водой или использовать циркуляционный насос с резервуаром; в этом случае рекомендовано использование дистиллированной или кипячёной (без окислыны) воды. Если поток уменьшился при использовании водопроводной воды, промойте всю систему теплой (без окислыны) водой. Циркуляция воды должна быть безупречна. Не допускайте перегрева. Когда вода попадает в контур охлаждения, температура охлаждающей воды не должна превышать 30° С.**
- ✓ **Смазывайте два цилиндра двигателя силиконовым маслом регулярно. Самый простой способ сделать это - убрать горячую пластину, подвинуть перемещающийся поршень к нижней мёртвой точке, с помощью соломинки накапать силиконового масла из сжатой бутылки, так чтобы оно потекло вниз по стенке цилиндра на вершину поршневого кольца. Так как перегородка не полностью непроницаема, необходимое масло достигнет нижнего поршневого кольца за короткое время.**
- ✓ **Никогда не подключайте сетевую обмотку (56221) без сердечника трансформатора.**

Выполнение эксперимента

1. Включите охлаждающую воду (для этого, установить, низковольтный блок питания в положение 12В), проверьте циркуляцию, и ждите, пока вода не побежит обратно через выпускающую трубу.
2. Положите конец выходной трубы в пластмассовый стаканчик, и определите объем вытекающей воды ΔV за интервал времени Δt (см. рис 2.).
3. Измеряйте температуру θ охлаждающей воды через каждые 2 минуты, и ждите до тех пор, пока температура не стабилизируется
4. Включите трансформатор сверхнизкого напряжения на 12В.
5. Как только нити раскаляться, запустите двигатель на горячем воздухе поворотом маховика по часовой стрелке. Если двигатель на горячем воздухе не запустился, выключите трансформатора и проверьте установку.
6. Как только двигатель на горячим воздухе начнет работать, уменьшите напряжение накала до $U = 8$ В. При необходимости, отрегулируйте U напряжение накала, а также измените ток накала.
7. Рассчитайте скорость вращения двигателя, которая определяется из измеренной частоты и количества отверстий в перфорированном диске.
8. Измерение температуры воды проводить через каждые 2 минуты, и ждать, пока температура не достигнет максимального значения.
9. Остановите электродвигатель, переведя регулятор «а» в среднее положение, и продолжайте измерять температуру охлаждающей воды.
10. Повторите измерения при напряжении накала 10В, 12В, 14В
11. Определите силу F по показаниям динамометра. Рассчитайте момент:

$$N = (F + M \cdot g) \cdot 0,25$$
12. Определить увеличение температуры охлаждающей воды.
13. Увеличьте силы трения тормоза, и повторите измерения.

Обработка и представление результатов

14. Результаты измерений занесите в таблицу 1,

Таблица 1.

Частота (Гц)	Напряжение (В)	Сила тока (А)	Изменение температуры (°C)

15. Рассчитайте Q_1 , Q_2 , W_R , W и результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2.

Частота (Гц)	Q_1 (Дж)	Q_2 (Дж)	W_R (Дж)	W (Дж)

16. Определите коэффициент полезного действия η двигателя по формуле (3), и результаты расчета представить в виде графика зависимости коэффициента полезного действия от частоты вращения двигателя.

Замечание. Мощность двигателя составляет $P = W f$, где f частота холостого хода или скорость. Вы можете определить частоту f с помощью светового барьера и счетчика. Другим способом является использование изображения частотного спектра Frequency Spectrum (нажмите на эту вкладку с помощью мыши). Однако, лучшее частотное разрешение требует больших измеренных значений, чем записано в примере (увеличьте число от 125 до, например, 2000 в диалоговом окне Параметры измерения Measuring Parameters dialog).

2423. ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ НА ГОРЯЧЕМ ВОЗДУХЕ, РАБОТАЮЩЕГО КАК ХОЛОДИЛЬНИК

Введение

Двигатель может работать как холодильник. Пусть теплота, которая вырабатывается Q_2 , а теплота, которая передается воде, на охлаждение Q_1 . Так как теплота передается от холодильника к более нагретому телу (воде), то есть в противоположном направлении спонтанной передачи тепла, то определенное количество механической работы W должно поставляться извне за один оборот. Холодильник, таким образом, это тепловая машина, которая работает в обратном направлении. Если нет никаких потерь, то следующее соотношение между величинами должно соблюдаться:

$$Q_1 = Q_2 + W \quad (1)$$

Коэффициент полезного действия холодильника определяется соотношением:
Эффективность холодильника определяется выражением:

$$\eta = \frac{Q_2}{W}. \quad (3)$$

Коэффициент полезного действия определяется экспериментально при движении маховика двигателя на горячем воздухе (двигатель Стирлинга) с электродвигателем с частотой f и определяется способностью электродвигателя нагревать, что поддерживает цилиндры при комнатной температуре для компенсации изменений. Электродвигатель поставляет за оборот теплоту Q_2 , которая определяется выражением:

$$Q_2 = \frac{U \cdot I}{f}, \quad (4)$$

где U - напряжение, а I - сила тока.

Увеличение температуры холодной воды требует дополнительной энергии в единицу времени, которая равна:

$$P = c \cdot \rho \cdot \frac{\Delta V}{\Delta t} \cdot \Delta \vartheta, \quad (5)$$

$c = 4,185$ Дж/(г·К) - удельная теплоемкость воды, $\rho = 1$ г/см⁻³ - плотность воды, $\frac{\Delta V}{\Delta t}$ -

объем вытекающей воды, который может быть измерен. Исходя из этих соотношений, можно рассчитать теплоту Q_1 , которая передается охлаждающей воде за один цикл, как:

$$Q_1 = \frac{P}{f}, \quad (6)$$

где f – частота вращения. Разность между $W' = Q_1 - Q_2$ позволяет рассчитать механическую работу, которая поставляется за один оборот. Она также содержит механическую работу W_R , которая требуется для преодоления трения поршня и вызывает дополнительное нагревание охлаждающей воды (см. работу 2421). Механическая работа, которая будет необходима для термодинамического цикла, то есть для передачи тепла от более холодного к более нагретому телу определяется выражением:

$$W = Q_1 - Q_2 - W_R \quad (7)$$

Цель работы

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутым циклам

Решаемые задачи

- ✓ Определение потерь на трение в воздушном двигателе, по нагреванию воды охлаждающего цикла.
 - ✓ Вычисление коэффициента полезного действия холодильника
-

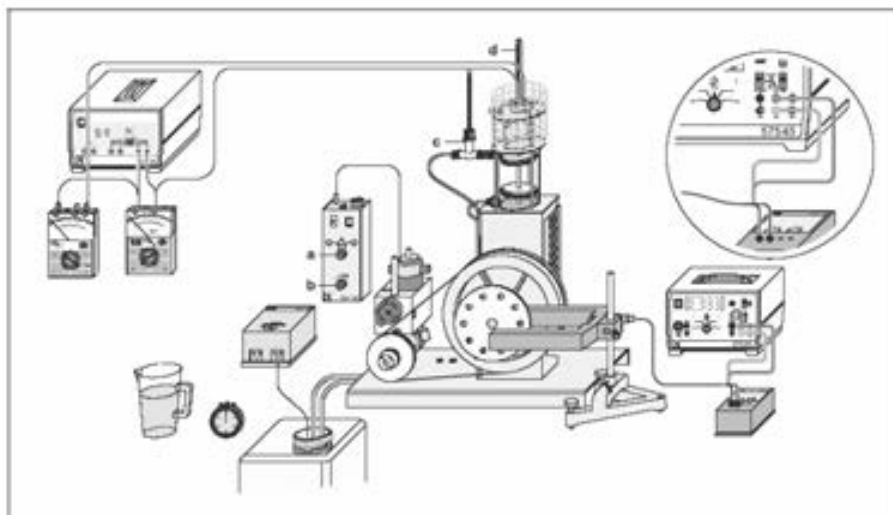
Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ Sensor-CASSY 524013
 - ✓ CASSY Lab2 524220
 - ✓ Источник тока 524031
 - ✓ датчик вращательного движения S 524082
 - ✓ Vbox 524038
 - ✓ датчиком давления и 529038
 - ✓ Двигатель на горячем воздухе 388182
 - ✓ Кордовая нить
 - ✓ Винтовая пружина из 35208ET2
 - ✓ U-сердечник с вилкой 56211
 - ✓ Зажимное устройство с пружинным зажимом 562121
 - ✓ катушка индуктивности, 500 витков 56221
 - ✓ низковольтная катушка индуктивности, 50 витков 56218
 - ✓ ПВХ трубки, \varnothing 8 мм 307 70
 - ✓ Водяной насос 12 В388181
 - ✓ Низковольтный источник питания 521231
 - ✓ Соединительные провода, 100 см, черный 50133
 - ✓ Резервуар для воды 10 л
-

Порядок выполнения работы

Подготовка эксперимента. Сборка установки



1. Снимите закручивающийся колпачок на выходе из головки цилиндра с трубок, по которым течет охлаждающая вода. Вставьте термометр в температурную вставку, и зажмите его с помощью гайки GL18.

Охлаждение двигателя:

2. Заполните канистру примерно 10 л воды.
3. Подключите выход насоса к трубке, по которой втекает в двигатель поток охлаждающей воды, и опустите насос в воду, направьте слив воды из двигателя в канистру.
4. Подключите насос к источнику питания низкого напряжения диапазон 12В. При необходимости, ослабьте шайбу GL на короткое время, позволяя воде подняться немного в стеклянную трубку, потом закрепите шайбу GL.

Настройка двигателя на горячем воздухе:

5. Поставьте электродвигатель, и подключить его к блоку управления.
6. Установите приводной ремень на маховик диска, и присоедините его к поворотному колесу электрического двигателя.

Измерение частоты:

7. Приложите диск с отверстиями от аксессуаров для двигателя горячего воздуха к коленчатому валу.
8. Консоль для измерения частоты включить в розетку, с помощью кнопки «mode» установить измерение частоты, горит индикатор «Hz», вход «E».
9. Направление луча света приведите в соответствие с отверстием, расположенным на диске.

Установка термометра и нагревателя.

10. Удалите нить "термометр с подогревом" из контакта штифтов.
11. Отвинтите винт прокладки из "головки цилиндра, и установите "термометр с нагревателем» на головку цилиндра.
12. Положите нить обратно на контактные штырьки, а также следите за тем, чтобы нить не касалась стекла термометра.
13. Осторожно прикрепите колпачок головки цилиндра на цилиндр двигателя горячего воздуха.
14. Поверните маховик двигателя горячего воздуха, и убедиться, что нить не касается перемещающегося поршня в любом положении поршня.
15. Подключите переменное сверхнизкое напряжение через трансформатор S на нагреватель вместе с вольтметром и амперметром (диапазон измерений 10А).

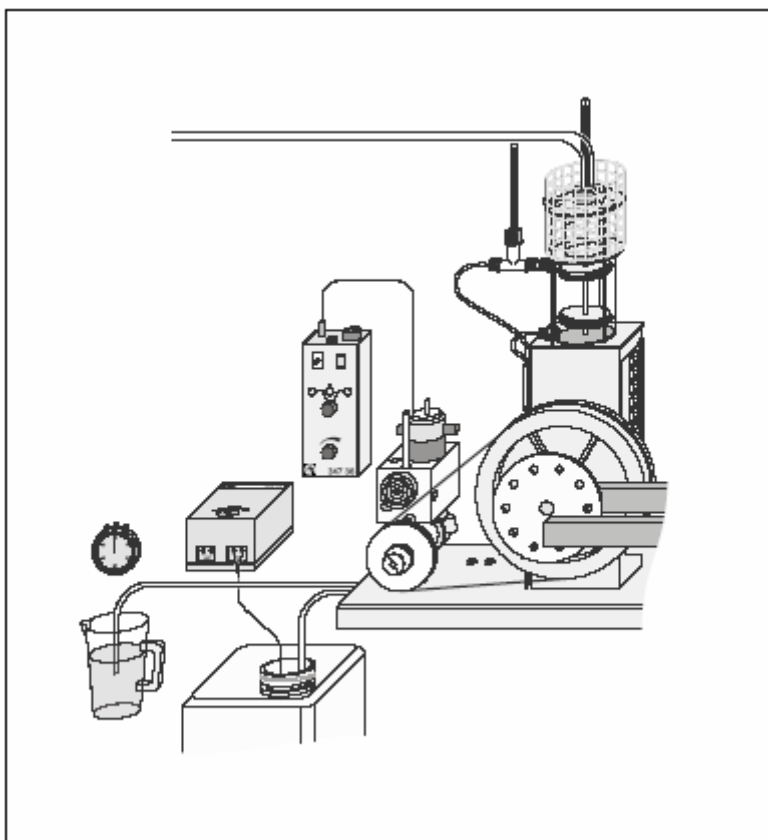


Рис.2. Определение объема вытекающей воды ΔV за время Δt .

Требования безопасности

- ✓ До проведения каждого эксперимента, убедитесь, что горячая пластина помещена в пазы и нагретая нить не касается перемещающегося поршня.
- ✓ Нагретая часть двигателя может стать очень горячей, шатуны при движении и перемещения поршней могут вызвать травмы при работе двигателя. По этой причине всегда используйте защитный чехол от прикосновений, когда двигатель работает.
- ✓ Никогда не используйте двигатель без охлаждающего потока воды. Вы можете соединить двигатель с краном с водопроводной водой или использовать циркуляционный насос с резервуаром; в этом случае рекомендовано использование дистиллированной или кипячёной (без окалины) воды. Если поток уменьшился при использовании водопроводной воды, промойте всю систему теплой (без окалины) водой. Циркуляция воды должна быть безупречна. Не допускайте перегрева. Когда вода попадает в контур охлаждения, температура охлаждающей воды не должна превышать 30^0 C.
- ✓ Смазывайте два цилиндра двигателя силиконовым маслом регулярно. Самый простой способ сделать это - убрать горячую пластину, подвинуть перемещающийся поршень к нижней мёртвой точке, с помощью соломинки капнуть силиконового масла из сжатой бутылки, так чтобы оно потекло вниз по стенке цилиндра на вершину поршневого кольца. Так как перегородка не полностью непроницаема, необходимое масло достигнет нижнего поршневого кольца за короткое время.
- ✓ Никогда не подключайте сетевую обмотку (56221) без сердечника трансформатора.

Выполнение эксперимента

1. Включите охлаждающую воду (для этого, установить, низковольтный блок питания в положение 12В), проверьте циркуляцию, и ждите, пока вода не побежит обратно через выпускающую трубу.
2. Положите конец выходной трубы в пластмассовый стаканчик, и определите объем вытекающей воды ΔV за интервал времени Δt (см. рис 2.).
3. Измерить температуру θ_1 в головке цилиндра.
4. Установите переключатель (а) в среднее положение (режим ожидания), установите ручку настройки скорости (b) в среднюю позицию, и включите блок управления.
5. Измеряйте температуру θ охлаждающей воды через каждые 2 минуты, и ждите до тех пор, пока температура не стабилизируется
6. Поверните переключатель (а) влево (вращение по часовой стрелке) и измерьте частоту вращения двигателя на горячем воздухе. Скорость вращения двигателя получается из измеренной частоты деленной на количество отверстий диска.
7. Включите трансформатор сверхнизкого напряжения S, а также выберите U напряжение нагрева так, чтобы температура θ_1 оставалось постоянной, несмотря на работу двигателя.
8. При необходимости, отрегулируйте U напряжение нагрева, а также измените ток нагрева.
9. Измерение температуры воды проводить через каждые 2 минуты, и ждать, пока температура не достигнет максимального значения.
10. Остановите электродвигатель, переведя регулятор «а» в среднее положение, и продолжайте измерять температуру охлаждающей воды.
11. Определите изменение температуры $\Delta\theta$ охлаждающей воды. Если объем доступной воды охлаждения слишком мал, температура Дьюара будет также расти. Измерьте температуру $\Delta\theta$, а потом внесите исправления, соответственно.
12. Измените скорость вращения электродвигателя с помощью ручки настройки скорости (b), и повторите измерения для пяти значений частоты.

Обработка и представление результатов

13. Результаты измерений занесите в таблицу 1,
Таблица 1.

Частота (Гц)	Напряжение (В)	Сила тока (А)	Изменение температуры (°C)

14. Рассчитайте Q_1 , Q_2 , W_R , W и результаты занесите в таблицу 2.

Таблица 2.

Частота (Гц)	Q_1 (Дж)	Q_2 (Дж)	W_R (Дж)	W (Дж)

15. Определите коэффициент полезного действия η двигателя по формуле (3), и результаты расчета представить в виде графика зависимости коэффициента полезного действия от частоты вращения двигателя.

Замечание. Мощность двигателя составляет $P = W f$, где f частота холостого хода или скорость. Вы можете определить частоту f с помощью светового барьера и счетчика. Другим способом является использование изображения частотного спектра Frequency Spectrum (нажмите на эту вкладку с помощью мыши). Однако, лучшее частотное разрешение требует больших измеренных значений, чем записано в примере (увеличьте число от 125 до, например, 2000 в диалоговом окне Параметры измерения Measuring Parameters dialog).

2424. pV ДИАГРАММА ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО НА НАГРЕТОМ ВОЗДУХЕ

Введение

Термодинамические квазистатические циклы можно описать замкнутой кривой на диаграмме pV (p - давление, V - объем). Работе, совершённой системой или над системой (в зависимости от направления вращения) соответствует площадь фигуры, ограниченной этой кривой. Данный эксперимент записывает pV диаграмму двигателя, работающего на горячем воздухе. Датчик давления замеряет давление p в цилиндре, а датчик перемещения измеряет положение поршня, которое позволяет вычислить объем, как функцию времени.

Цель работы

Знакомство с законами тепловых машин, работающих по замкнутым циклам

Решаемые задачи

- ✓ Запись цикла теплового двигателя в координатах pV
- ✓ Вычисление полезной работы двигателя

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ Sensor-CASSY 524013
- ✓ CASSY Lab2 524220
- ✓ Источник тока 524031
- ✓ датчик вращательного движения S 524082
- ✓ Vbox 524038
- ✓ датчиком давления и 529038
- ✓ Двигатель на горячем воздухе 388182
- ✓ Кордовая нить
- ✓ Винтовая пружина из 35208ET2
- ✓ U-сердечник с вилкой 56211
- ✓ Зажимное устройство с пружинным зажимом 562121
- ✓ катушка индуктивности, 500 витков 56221
- ✓ низковольтная катушка индуктивности, 50 витков 56218
- ✓ ПВХ трубки, \varnothing 8 мм 307 70
- ✓ Водяной насос 12 B388181
- ✓ Низковольтный источник питания 521231

- ✓ Соединительные провода, 100 см, черный 50133
- Резервуар для воды 10 л

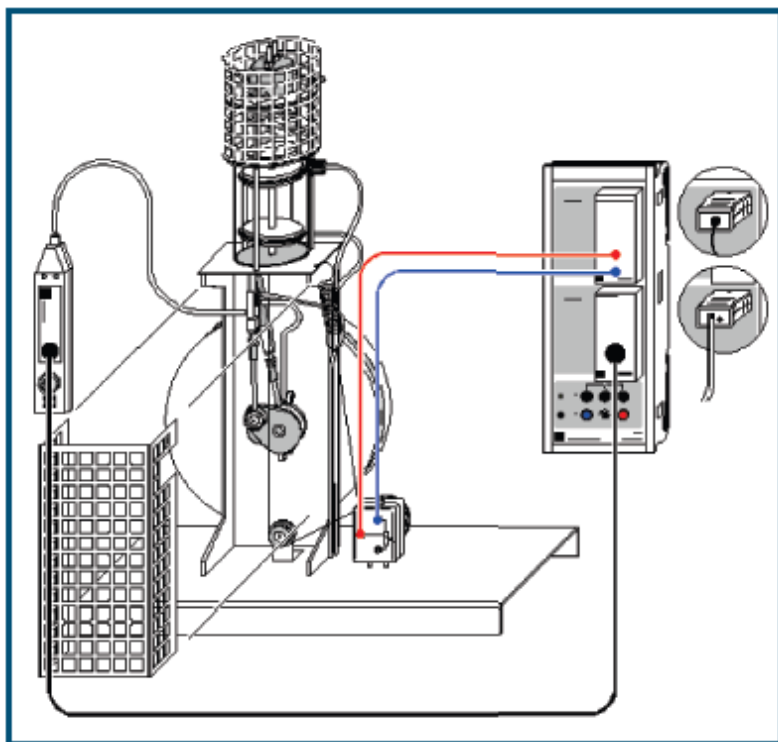


Рис.1

Порядок выполнения работы

Подготовка эксперимента. Сборка установки

1. Установите съёмный трансформатор и зажмите скобу на нём.
2. Установите горячую пластину как описано в экспериментальной установке и подсоедините нагреватель к двум внешним разъёмам низковольтной катушки, используя два соединительных провода.
3. Вставьте шланг датчика давления в штуцер давления рабочего поршня шатуна. Датчик давления подключите к Vbox на входе BSensor-CASSY.
4. Прикрепите датчик перемещения к опорной плите с двумя соединительными разъёмами и подключите его ко входу ASensor-CASSY.
5. Рабочий поршень снабжен иглой с ушком на нижнем конце для крепления шнура. Подвесьте возвратную пружину в отверстие основания. Она должна быть растянута, когда цилиндр находится в нижней мертвой точке. Обмотайте шнур два раза вокруг блока датчика перемещения, чтобы предотвратить скольжение! При калибровке датчика имейте ввиду, что объем цилиндра при положении поршня в верхней мертвой точке приблизительно 50 см^3 .


Требования безопасности

- ✓ До проведения каждого эксперимента, убедитесь, что горячая пластина помещена в пазы и нагретая нить не касается перемещающегося поршня.
- ✓ Нагретая часть двигателя может стать очень горячей, шатуны при движении и перемещения поршней могут вызвать травмы при работе двигателя. По этой

причине всегда используйте защитный чехол от прикосновений, когда двигатель работает.

- ✓ Никогда не используйте двигатель без охлаждающего потока воды. Вы можете соединить двигатель с краном с водопроводной водой или использовать циркуляционный насос с резервуаром; в этом случае рекомендовано использование дистиллированной или кипячёной (без окислы) воды. Если поток уменьшился при использовании водопроводной воды, промойте всю систему теплой (без окислы) водой.
- ✓ Смазывайте два цилиндра двигателя силиконовым маслом регулярно. Самый простой способ сделать это - убрать горячую пластину, подвинуть перемещающийся поршень к нижней мёртвой точке, с помощью соломинки накапать силиконового масла из сжатой бутылки, так чтобы оно потекло вниз по стенке цилиндра на вершину поршневого кольца. Так как перегородка не полностью непроницаема, необходимое масло достигнет нижнего поршневого кольца за короткое время.
- ✓ Никогда не подключайте сетевую обмотку (56221) без сердечника трансформатора.

Выполнение эксперимента

1. Загрузите настройки CASSY с Рабочего стола
2. Проверьте датчик перемещения, чтобы убедиться, что он работает правильно: поверните мотор один раз рукой и наблюдайте, находится ли отображаемый объём в пределах диапазона измерения. Если это не так, слегка ослабьте шнур, поверните колесо датчика перемещения, пока отображаемое значение не станет правильным.
3. Включите подогрев с помощью переключателя на сетевой катушке. При запуске в первый раз, вы должны подождать примерно 1 минуту до запуска двигателя, пока газ станет достаточно горячим для легкого запуска. В последующих экспериментах вы можете запустить двигатель, когда нагревательная спираль начинает светиться.
4. Начните измерение, нажав кнопку  (F9). Программа автоматически записывает и отображает определенное количество измеряемых точек; измерение настроено работать всего несколько циклов, чтобы упростить последующее интегрирование.
5. Проверьте правильно ли вычисляется объём. Он должен получаться путем умножения площади поршня ($28,3 \text{ см}^2$, т.к. диаметр составляет 60 мм) на путь поршня S_{A1} .
6. Работа за цикл определяется как площадь фигуры ограниченной полученной кривой. Для её вычисления выберите Calculate Integral (Peak Area) в меню Evaluations (нажмите правой кнопкой мыши на диаграмму) и отметьте один цикл (нажмите на начальную точку, нажмите и удерживайте левую кнопку мыши и перетащите указатель вдоль цикла). Точки, используемые для интегрирования, будут выделены. При отпускании кнопки мыши, площадь цикла будет выделена цветом, и соответствующее значение отобразится в строке состояния Status line.

Замечание. Мощность двигателя составляет $P = W f$, где f частота холостого хода или скорость. Вы можете определить частоту f с помощью светового барьера и счетчика. Другим способом является использование изображения частотного спектра Frequency Spectrum (нажмите на эту вкладку с помощью мыши). Однако, лучшее частотное разрешение требует больших измеренных значений, чем записано в примере (увеличьте число от 125 до, например, 2000 в диалоговом окне Параметры измерения Measuring Parameters dialog).

Введение

Тепловой насос, схема которого представлена на рисунке 1, извлекает энергию из теплового резервуара с температурой T_1 при испарении охлаждающей жидкости и передает энергию в резервуар с температурой T_2 в процессе конденсации газа - теплоносителя. В результате разность температур $\Delta T = T_2 - T_1$ между двумя резервуарами увеличивается. Эффективность теплового насоса определяется следующим отношением:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A}, \quad (1)$$

где Q_2 – количество теплоты, переданное тепловым насосом в резервуар с температурой T_2 за определенный промежуток времени и A – работа, затраченная на процесс передачи за тот же промежуток времени. Коэффициент полезного действия поршневого компрессора приметно равен 80%. Мы будем приближенно считать, что производимая компрессором работа A равна потребляемой им электрической энергии W .

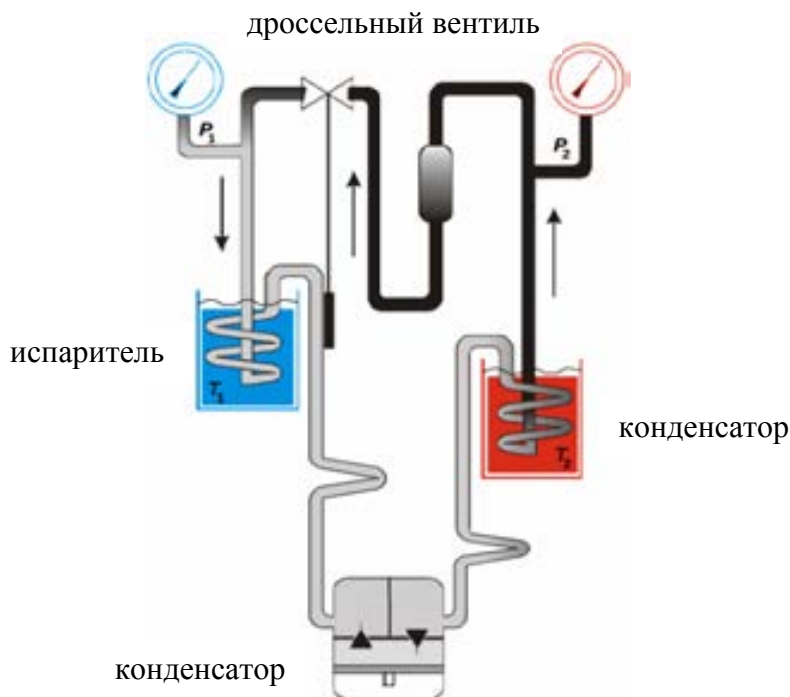


Рис.1 Схема теплового насоса

Эффективность теплового насоса может достигать значений больше единицы. На первый взгляд, это противоречит первому началу термодинамики. Но это не так, достаточно понять, что речь идет об использовании электрической энергии (работы) для переноса тепловой энергии (теплоты), а не использование количества теплоты для производства работы, как в тепловых машинах. Запишем закон сохранения энергии для всего процесса (предполагается, что все величины положительные):

$$Q_2 = A + Q_1 - Q_{\text{п}}, \quad (2)$$

где Q_1 - энергия, полученная из резервуара с температурой T_1 и Q_{π} - потери энергии в процессе, характеризующиеся потерей теплоты в нагреваемом резервуаре, в трубопроводе теплового насоса и компрессоре. Таким образом, эффективность теплового насоса может быть больше единицы, если тепловая энергия, взятая теплоносителем из резервуара с температурой T_1 больше энергии потерь Q_{π} :

$$\frac{Q_2}{A} = \frac{W + Q_1 - Q_{\pi}}{A} = 1 + \frac{Q_1 - Q_{\pi}}{A}, \quad (3)$$

Целью данного эксперимента является определение эффективности теплового насоса как функции разности температур между теплым и холодным резервуаром: $\Delta T = T_2 - T_1$. В данном эксперименте используется две емкости с водой, в качестве резервуаров 1 и 2. Холодная вода имеет температуру T_1 , а теплая вода - температуру T_2 . Эффективность нагрева тепловым насосом можно записать как:

$$\frac{Q_2}{\Delta t} = \frac{\Delta T_2}{\Delta t} \cdot c \cdot m, \quad (4)$$

где $\Delta T_2 = T_2 - T_0$, T_0 - начальная температура воды в обеих емкостях, Δt - промежуток времени, соответствующий изменению температуры ΔT_2 , m - масса воды и c - удельная теплоемкость воды.

С учетом выражения (4), эффективность теплового насоса определяется соотношением:

$$\varepsilon = \frac{Q_2}{A} = \frac{Q_2}{W} = \frac{\Delta T_2 \cdot c \cdot m}{P \cdot \Delta t}. \quad (5)$$

Энергия Q_2 рассчитывается по изменению температуры ΔT_2 за промежуток времени Δt .

Затрачиваемая компрессором мощность $P = \frac{W}{\Delta t}$ измеряется ваттметром.

Цель работы

Определение эффективности теплового насоса в зависимости от разности температур тепловых резервуаров.

Решаемые задачи

- ✓ Понять принципы работы теплового насоса
- ✓ Определить эффективность теплового насоса

Экспериментальная установка

Приборы и принадлежности

- ✓ тепловой насос
- ✓ ваттметр
- ✓ цифровой вольтметр
- ✓ два датчика температуры (термопары)
- ✓ секундомер

тепловой насос

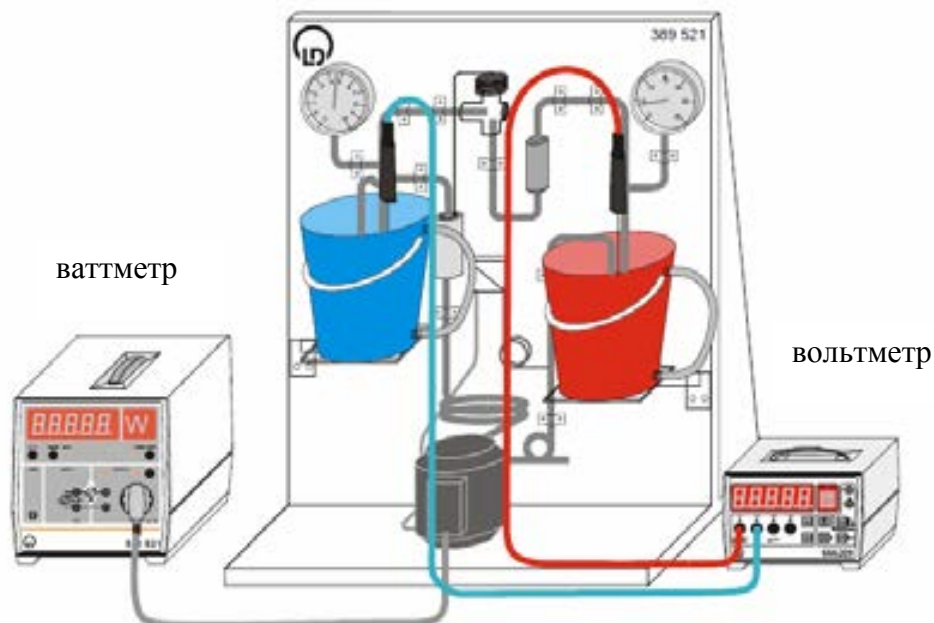


Рис.2 Схема экспериментальной установки

Порядок выполнения работы

Подготовка установки к работе

1. Налить по 4 литра воды в ведра. Аккуратно установить ведра на подставки.
2. Зафиксировать термометры в держателях (поместить в соответствующие пазы), расположенных на медных трубках конденсора и испарителя.
3. Запустить на ноутбуке выполнение программы CASSY Lab 2. Загрузить настройки для работы: File-Open:D:\эксперименты\2631_131118dir.
4. Включить ваттметр и вольтметр (тумблеры расположены на задней панели приборов).

Проведение измерений

5. Включить компрессор, поставив галочки в пунктах настроек (Window-Show Settings): Settings – CASSYs and other devices – Joule and Watt Meter – Active power P и Voltage U (115/220V).
6. Через 3 минуты запустить измерение температуры (клавиша F9).
7. В течение эксперимента необходимо медленно помешивать воду в резервуарах с холодной и теплой водой.

8. Пронаблюдать изменение температуры T_1 и T_2 от времени во вкладке **Standart**.
9. Во вкладке **Efficiency** представлена таблица и график зависимости эффективности теплового насоса ε от разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$ в резервуарах.
10. Через 15 минут (900 секунд) измерение температуры автоматически остановится.
11. Отключить компрессор, поставив галочку в пункте настроек (**Window-Show Settings**): **Settings – CASSYs and other devices – Joule and Watt Meter – Voltage U** .
12. В случае последующей обработки данных на компьютере выделить и Сохранить результаты экспериментов нажатием F2: **D:Students\Номер группы\Фамилия**.

Обработка и представление результатов

13. Представить графики зависимости температуры T_1 и T_2 от времени и эффективности теплового насоса ε от разности температур $\Delta T = T_2 - T_1$ в отчете к работе. В случае ручной обработки графиков ограничится тридцатью экспериментальными точками, сохранив при этом весь диапазон значений измеренных величин.
14. Проанализировать зависимость эффективности теплового насоса ε от разности температур ΔT .

Список дополнительной литературы

Гелясин А.Е. Тепловой насос — холодильник наоборот // Фізика: проблеми викладання. – 2009. – № 2. – С. 44-50.
<http://www.alsak.ru/item/335-7.html>

Вопросы для подготовки

1. Процессы в идеальных газах (изобарный, изохорный, изотермический, адиабатический) и уравнения, их описывающие.
2. Работа. Количество теплоты. Первое начало термодинамики
3. Циклическая тепловая машина. Обратная тепловая машина.
4. Постулаты второго начала термодинамики.
5. Цикл Карно. Первая теорема Карно.
6. Устройство и принцип работы теплового насоса. Рабочий цикл теплового насоса.